

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

## **DETEKSI HUBUNG SINGKAT PADA TRAFO 3 FASA MENGGUNAKAN TEGANGAN UJI SURJA**

Prasetyo Tri Anggoro  
NRP. 07111440000072

Dosen Pembimbing  
Danar Fahmi, S.T., M.T.  
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**DETEKSI HUBUNG SINGKAT PADA TRAFO 3 FASA  
MENGUNAKAN TEGANGAN UJI SURJA**

Prasetyo Tri Anggoro  
NRP 07111440000072

Dosen Pembimbing  
Danar Fahmi, S.T., M.T.  
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





**FINAL PROJECT - TE 141599**

## **Short Circuit Detection On 3-Phase Transformer Using Voltage Surge Test**

Prasetyo Tri Anggoro  
NRP 07111440000072

Advisors  
Danar Fahmi, S.T., M.T.  
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan tugas akhir saya dengan judul **“Deteksi Hubung Singkat Pada Trafo 3 Fasa Menggunakan Tegangan Uji Surja”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 15 Oktober 2018



**Prasetyo Tri Anggoro**  
NRP. 0711144000072







ITS  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember



ITS  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**DETEKSI HUBUNG SINGKAT PADA TRAFO 3 FASA  
MENGUNAKAN TEGANGAN UJI SURJA**

Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR**

Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagai Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**



ITS  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing I**

**Daniar Fahmi, S.T., M.T.**  
NIP. 198909252014041002

**Dosen Pembimbing II**

**Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.**  
NIP. 198109052005011002





# **Deteksi Hubung Singkat Pada Trafo 3 Fasa Menggunakan Tegangan Uji Surja**

**Nama** : Prasetyo Tri Anggoro  
**Pembimbing I** : Daniar Fahmi, S.T., M.T.  
**Pembimbing II** : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

## **ABSTRAK**

Hubung singkat merupakan sebuah gangguan yang sering terjadi pada peralatan listrik salah satunya pada trafo 3 fasa. Dalam mencegah hal tersebut, tegangan uji surja dapat digunakan sebagai metode untuk mendeteksi adanya hubung singkat pada trafo tersebut dengan cara menginjeksikan tegangan surja ke belitan trafo yang ingin dideteksi. Berdasarkan Berdasarkan IEEE 522, tegangan yang digunakan pada objek uji sebesar  $5p_u$  atau 1551V namun karena peralatan hanya terbatas pada 1200V sehingga tegangan yang digunakan sebesar 1000V. Setelah itu tegangan surja menyuplai trafo 3 fasa dan hasil respon tegangannya diidentifikasi dengan membandingkan pada kondisi normal dan kondisi gangguan menggunakan metode L-L EAR dan Test-Ref EAR (*Error Area Ratio*). Dimana metode tersebut merupakan metode yang melihat secara kuantitatif perbedaan dari kedua gelombang sehingga akan didapatkan sebuah nilai yang merepresentasikan seberapa besar gangguan hubung singkat yang terjadi dengan standar yang telah ditentukan. Hasil yang didapat adalah terdapat perbedaan bentuk gelombang surja ketika trafo dalam keadaan normal dengan keadaan diberi hubung singkat. Sehingga hubung singkat dapat dideteksi dengan membandingkan nilai EAR dengan standar yang ada. Selain itu frekuensi gelombang surja akan meningkat seiring dengan meningkatnya persentase hubung singkat yang diberikan dan tren dari nilai EAR akan terus naik seiring dengan meningkatnya persentase fault yang diberikan tetapi tidak linier.

**Kata Kunci** : Trafo 3 Fasa, Hubung Singkat, L-L EAR, *Test-Ref* EAR

Halaman ini sengaja dikosongkan

## ***Short Circuit Detection On 3-Phase Transformer Using Voltage Surge Test***

**Name** : Prasetyo Tri Anggoro  
**Advisor I** : Daniar Fahmi, S.T., M.T.  
**Advisor II** : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

### **ABSTRACT**

*Short circuit is a fault which is occurred in electric equipment frequently such as 3-Phase Transformer. To prevent it, surge voltage can be used as a method to detect short circuit in winding of transformer by injecting surge voltage to its winding which wants to be detected. According to IEEE 522, voltage which is used to the object is 5pu equal to 1551V but the voltage rating which can be injected by the equipment of surge test is 1200V. as a result, the voltage which is used is 1000V. then, surge voltage supplies 3-Phase Transformer and the result of surge response can be identified by comparing normal surge wave to fault surge wave with L-L EAR and Test-Ref EAR (Error Area Ratio) which is a method to compare the difference of both wave quantitatively resulting a value which represents short circuit value based on standard. As a result, there is difference of normal surge wave and fault surge wave. So that, short circuit can be detected by comparing value of EAR to the standard. Besides, frequency of surge wave will be increased as long as increasing of percentage of fault and percentage of EAR will be increased too as long as percentage of fault is increased although it is not linear.*

**Keyword : 3-Phase Transformer, Short Circuit, L-L EAR, Test-Ref EAR**

Halaman ini sengaja dikosongkan

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunianya dalam penyelesaian laporan tugas akhir. Laporan tugas akhir ini dibuat dalam rangka memenuhi syarat kelulusan di Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Adapun judul tugas akhir yang penulis buat ialah **Deteksi Hubung Singkat Pada Trafo 3 Fasa Menggunakan Tegangan Uji Surja**.

Dalam proses penyusunannya penulis telah banyak dibantu oleh berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT karena telah memberikan kelancaran dan keselamatan selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua dari penulis yang selalu memberikan dukungan terbaiknya untuk penulis, baik dalam hal materil maupun non-materil serta doa yang selalu beliau panjatkan untuk kelancaran perkuliahan dan penyelesaian tugas akhir.
3. Kekasih dari penulis yang selalu memberi semangat, memberi doa, memberi nasihat, saran dan kritik, semua aspek yang secara langsung dan tidak langsung dapat mempengaruhi penulis dalam penulisan tugas akhir ini Yusriya Fadhila Salma.
4. Bapak Daniar Fahmi selaku dosen pembimbing pertama dari laporan tugas akhir yang penulis tempuh dimana selalu memberikan dukungan, bimbingan dan pendampingan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
5. Bapak Dimas Anton Asfani selaku dosen pembimbing kedua dari laporan tugas akhir yang selalu membimbing dan mendampingi penulis selama pengerjaan tugas akhir ini.
6. Teman yang selalu ada ketika susah dan senang yang selalu memberi arti hidup bahwa hidup harus selalu senang dan tidak perlu khawatir ketika sulit karena selalu ada teman yang menemani, Ilham Dirgantara dan Fathu Prasetyo.
7. Teman-teman yang selalu sibuk tapi selalu ada ketika dibutuhkan dan memberi semangat didetik-detik menuju waktu siding Diana dan Sarah.
8. Teman-teman yang selalu membantu dengan caranya mereka sendiri melalui semangat dan doa Khairunnisa Nurhandayani, Hadi Lizikri Al-Azmi, Nomala Gema, dan Verdiansyah.

9. Teman yang selalu membantu penulis dalam hal-hal Teknis maupun non teknis dalam penulisan tugas akhir yaitu Reno Hidayat, Luthfi Lukman Hakim, dan Rizki Arvianta.
10. Teman-teman yang selalu menemani penulis sampai pagi di laboratorium tegangan tinggi yaitu Jefri Haris Setiadi, Mas Adit, dan Mas Ikhlas.
11. Teman-teman keluarga laboratorium tegangan tinggi terutama bagi yang sepejuangan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
12. Keluarga besar e54 yang selalu sedia memberikan dukungan dan bantuan sejak awal penulis kuliah hingga saat penulis menyelesaikan tugas akhir ini

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir yang penulis tulis masih jauh dari kata sempurna.

Surabaya, 28 Mei 2018

Prasetyo Tri Anggoro  
07111440000072



## DAFTAR ISI

|  |      |
|--|------|
| HALAMAN JUDUL  |      |
| PERNYATAAN KEASLIAN  |      |
| HALAMAN PENGESAHAN   |      |
| ABSTRAK.....   | i    |
| ABSTRACT.....  | iii  |
| KATA PENGANTAR .....   | v    |
| DAFTAR ISI.....  | vii  |
| DAFTAR GAMBAR .....  | ix   |
| DAFTAR TABEL.....  | xiii |
| BAB 1 PENDAHULUAN .....  | 1    |
| 1.1 Latar Belakang.....  | 1    |
| 1.2 Permasalahan .....   | 2    |
| 1.3 Tujuan .....   | 2    |
| 1.4 Metodologi.....  | 3    |
| 1.5 Sistematika.....   | 4    |
| 1.6 Relevansi.....   | 5    |
| BAB 2 PEMBANGKITAN TEGANGAN SURJA, UJI<br>TEGANGAN SURJA, DAN TRAFO.....     | 7    |
| 2.1 Pembangkitan Tegangan Tinggi DC.....                                     | 7    |
| 2.2 Tes Surja .....  | 8    |
| 2.3 Trafo .....  | 9    |
| 2.4 Hubung Singkat Pada Trafo.....   | 13   |
| 2.5 Standar Tegangan Uji Surja .....   | 13   |
| 2.6 Metode EAR .....   | 14   |
| BAB 3 PERANCANGAN SISTEM DAN ALAT .....                                      | 17   |
| 3.1 Konfigurasi Sistem .....   | 17   |
| 3.2 Perancangan Hardware .....   | 19   |
| 3.2.1 Pembangkit Tegangan Tinggi DC.....                                     | 19   |
| 3.2.2 Rangkaian <i>Switching</i> , Kapasitor Surja, dan Arduino<br>Uno ..... | 19   |
| 3.2.3 Verivolt .....   | 22   |
| 3.2.4 Sensor Tegangan NI-9223.....   | 22   |
| 3.3 Perancangan Software.....  | 23   |
| 3.3.1 Perancangan Program Arduino .....                                      | 23   |
| 3.3.2 Perancangan Program LabVIEW .....                                      | 24   |
| 3.4 Perancangan Transformer .....  | 25   |
| 3.4.1 Perancangan Konfigurasi Delta.....                                     | 28   |

|   |     |
|---|-----|
| 3.4.2 Perancangan Konfigurasi Star.....   | 28  |
| 3.5 Pengujian Pembangkitan Tegangan Surja .....   | 29  |
| 3.5.1 Pengujian Rangkaian <i>Single Secondary Winding</i><br><i>Villard Cascade</i> ..... | 29  |
| 3.5.2 Pengujian <i>rise time</i> Gelombang Surja.....                                     | 31  |
| 3.6 Pengukuran Belitan Trafo 3 Fasa .....   | 32  |
| BAB 4 HASIL DAN ANALISIS.....   | 43  |
| 4.1 Hasil dan Analisis Gelombang Surja pada Konfigurasi<br>Delta.....                     | 43  |
| 4.2 Hasil dan Analisis Gelombang Surja pada Konfigurasi<br><i>Star</i> .....              | 68  |
| BAB 5 PENUTUP .....   | 93  |
| 5.1 Kesimpulan.....   | 93  |
| 5.2 Saran.....  | 93  |
| DAFTAR PUSTAKA .....  | 95  |
| LAMPIRAN .....  | 97  |
| RIWAYAT HIDUP .....   | 103 |

## DAFTAR GAMBAR

|  |    |
|--|----|
| Gambar 2.1 Rangkaian <i>Single Secondary Winding Villard Cascade</i> .....   | 7  |
| Gambar 2.2 Rangkaian Ekvivalen Pengujian Surja .....   | 8  |
| Gambar 2.3 Konfigurasi Wye .....   | 11 |
| Gambar 2.4 Konfigurasi Delta .....   | 12 |
| Gambar 3.1 Diagram Blok Konfigurasi Pengujian Surja .....  | 17 |
| Gambar 3.2 Setup Rangkaian Pengujian Tegangan Surja.....   | 18 |
| Gambar 3.3 Arduino Uno.....  | 20 |
| Gambar 3.4 Rangkaian Switching dan Kapasitor Surja .....   | 21 |
| Gambar 3.5 <i>Single Secondary Winding Villard Cascade</i> .....   | 21 |
| Gambar 3.6 Verivolt .....  | 22 |
| Gambar 3.7 National Instrument - 9223.....   | 22 |
| Gambar 3.8 Flowchart Program Arduino.....  | 24 |
| Gambar 3.9 Trafo 3 Fasa.....   | 25 |
| Gambar 3.10 Skematik External Tap Trafo 3 Fasa .....   | 26 |
| Gambar 3.11 Skematik Pengujian Surja Pada Konfigurasi Delta .....  | 28 |
| Gambar 3.12 Skematik Pengujian Surja Pada Konfigurasi Star .....   | 28 |
| Gambar 3.13 Perbandingan Hasil Pengujian dan Perhitungan<br>Tegangan Ouput Rangkaian <i>Single Secondary</i><br><i>Winding Villard Cascade</i> ..... | 30 |
| Gambar 3.14 Nilai Resistansi Sisi Primer Fasa A.....   | 33 |
| Gambar 3.15 Nilai Resistansi Sisi Primer Fasa B .....  | 33 |
| Gambar 3.16 Nilai Resistansi Sisi Primer Fasa C .....  | 34 |
| Gambar 3.17 Nilai Resistansi Sisi Sekunder Fasa a .....  | 34 |
| Gambar 3.18 Nilai Resistansi Sisi Sekunder Fasa b .....  | 35 |
| Gambar 3.19 Nilai Resistansi Sisi Sekunder Fasa c.....   | 35 |
| Gambar 3.20 Nilai Induktansi Sisi Primer Fasa A .....  | 36 |
| Gambar 3.21 Nilai Induktansi Sisi Primer Fasa B .....  | 36 |
| Gambar 3.22 Nilai Induktansi Sisi Primer Fasa C .....  | 37 |
| Gambar 3.23 Nilai Induktansi Sisi Sekunder Fasa a .....  | 37 |
| Gambar 3.24 Nilai Induktansi Sisi Sekunder Fasa b .....  | 38 |
| Gambar 3.25 Nilai Induktansi Sisi Sekunder Fasa c .....  | 38 |
| Gambar 3.26 Nilai Kapasitansi Sisi Primer Fasa A .....   | 39 |
| Gambar 3.27 Nilai Kapasitansi Sisi Primer Fasa B.....  | 39 |
| Gambar 3.28 Nilai Kapasitansi Sisi Primer Fasa C.....  | 40 |

|   |    |
|---|----|
| Gambar 3.29 Nilai Kapasitansi Sisi Sekunder Fasa a .....                                | 40 |
| Gambar 3.30 Nilai Kapasitansi Sisi Sekunder Fasa b.....                                 | 41 |
| Gambar 3.31 Nilai Kapasitansi Sisi Sekunder Fasa c .....                                | 41 |
| Gambar 4.1 Nilai EAR Belitan Primer Fasa AB-AC, Line to Line<br>Fault, L-L EAR .....    | 50 |
| Gambar 4.2 Gelombang Surja Primer Fasa AB-AC, Line to Line<br>Fault .....               | 51 |
| Gambar 4.3 Nilai EAR Belitan Primer Fasa AC-BC, Line to Line<br>Fault L-L EAR .....     | 52 |
| Gambar 4.4 Gelombang Surja Primer Fasa AC-BC, Line to Line<br>Fault .....               | 53 |
| Gambar 4.5 Nilai EAR Belitan Primer Fasa BC-AB, Line to Line<br>Fault, L-L EAR .....    | 54 |
| Gambar 4.6 Gelombang Surja Primer Fasa BC-AB, Line to Line<br>Fault .....               | 55 |
| Gambar 4.7 Nilai EAR Belitan Primer Fasa AB, Line to Line Fault,<br>Test-Ref EAR.....   | 56 |
| Gambar 4.8 Gelombang Surja Primer Fasa AB, Line to Line Fault .....                     | 57 |
| Gambar 4.9 Nilai EAR Belitan Primer Fasa AC, Line to Line Fault,<br>Test-Ref EAR.....   | 58 |
| Gambar 4.10 Gelombang Surja Primer Fasa AC, Line to Line Fault ....                     | 59 |
| Gambar 4.11 Nilai EAR Belitan Primer Fasa B-C, Line to Line<br>Fault, Test-Ref EAR..... | 60 |
| Gambar 4.12 Gelombang Surja Primer Fasa B-C, Line to Line Fault ...                     | 61 |
| Gambar 4.13 Nilai EAR Belitan Primer Fasa A, Inter Turn Fault,<br>Test-Ref EAR.....     | 62 |
| Gambar 4.14 Gelombang Surja Primer Fasa A, Inter Turn Fault .....                       | 63 |
| Gambar 4.15 Nilai EAR Belitan Primer Fasa B, Inter Turn Fault,<br>Test-Ref EAR.....     | 64 |
| Gambar 4.16 Gelombang Surja Primer Fasa B, Inter Turn Fault .....                       | 65 |
| Gambar 4.17 Nilai EAR Belitan Primer Fasa C, Inter Turn Fault,<br>Test-Ref EAR.....     | 66 |
| Gambar 4.18 Gelombang Surja Primer Fasa C, Inter Turn Fault .....                       | 67 |
| Gambar 4.19 Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa ab-ac, Line to Line<br>Fault, L-L EAR ..... | 75 |

|   |    |
|---|----|
| Gambar 4.20 Gelombang Surja Sekunder Fasa ab-ac, <i>Line to Line</i><br><i>Fault</i> .....            | 76 |
| Gambar 4.21 Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa ac-bc, <i>Line to Line</i><br><i>Fault, L-L EAR</i> ..... | 77 |
| Gambar 4.22 Gelombang Surja Sekunder Fasa ac-bc, <i>Line to Line</i><br><i>Fault</i> .....            | 78 |
| Gambar 4.23 Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa bc-ab, <i>Line to Line</i><br><i>Fault, L-L EAR</i> ..... | 79 |
| Gambar 4.24 Gelombang Surja Sekunder Fasa bc-ab, <i>Line to Line</i><br><i>Fault</i> .....            | 80 |
| Gambar 4.25 Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa a-b, <i>Line to Line</i><br><i>Fault, Test-Ref</i> .....  | 81 |
| Gambar 4.26 Gelombang Surja Sekunder Fasa a-b, <i>Line to Line</i><br><i>Fault</i> .....              | 82 |
| Gambar 4.27 Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa a-c, <i>Line to Line</i><br><i>Fault, Test-Ref</i> .....  | 83 |
| Gambar 4.28 Gelombang Surja Sekunder Fasa a-c, <i>Line to Line</i><br><i>Fault</i> .....              | 84 |
| Gambar 4.29 Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa b-c, <i>Line to Line</i><br><i>Fault, Test-Ref</i> .....  | 85 |
| Gambar 4.30 Gelombang Surja Sekunder Fasa b-c, <i>Line to Line</i><br><i>Fault</i> .....              | 86 |
| Gambar 4.31 Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa a-n, <i>Inter Turn</i><br><i>Fault, Test-Ref</i> .....    | 87 |
| Gambar 4.32 Gelombang Surja Sekunder Fasa a-n, <i>Inter Turn</i><br><i>Fault</i> .....                | 88 |
| Gambar 4.33 Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa b-n, <i>Inter Turn</i><br><i>Fault, Test-Ref</i> .....    | 89 |
| Gambar 4.34 Gelombang Surja Sekunder Fasa b-n, <i>Inter Turn</i><br><i>Fault</i> .....                | 90 |
| Gambar 4.35 Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa c-n, <i>Inter Turn</i><br><i>Fault, Test-Ref</i> .....    | 91 |
| Gambar 4.36 Gelombang Surja Sekunder Fasa c-n, <i>Inter Turn</i><br><i>Fault</i> .....                | 92 |

Halaman ini sengaja dikosongkan

## DAFTAR TABEL

|  |    |
|--|----|
| Tabel 2.1 Standar Tegangan Surja .....   | 14 |
| Tabel 2.2 Kriteria Pass/Fail EAR.....  | 15 |
| Tabel 3.1 Spesifikasi Reed Relay.....  | 21 |
| Tabel 3.2 Spesifikasi IGBT.....  | 21 |
| Tabel 3.3 Spesifikasi Trafo 3 Fasa .....   | 27 |
| Tabel 3.4 External Tap Trafo 3 Fasa.....   | 27 |
| Tabel 3.5 Hasil Pengujian dan Perhitungan Tegangan Ouput<br>Rangkaian Single Secondary Winding Villard Cascade ..... | 30 |
| Tabel 3.6 Hasil Pengukuran Rise Time dengan Fault antar Fasa .....   | 31 |
| Tabel 3.7 Hasil Pengukuran Rise Time dengan Fault antar Turn .....   | 31 |
| Tabel 4.1 EAR Referensi Sisi Primer Fasa A-B .....   | 44 |
| Tabel 4.2 EAR Referensi Sisi Primer Fasa A-C .....   | 45 |
| Tabel 4.3 EAR Referensi Sisi Primer Fasa B-C.....  | 46 |
| Tabel 4.4 EAR Referensi Sisi Primer Fasa A .....   | 47 |
| Tabel 4.5 EAR Referensi Sisi Primer Fasa B.....  | 48 |
| Tabel 4.6 EAR Referensi Sisi Primer Fasa C.....  | 49 |
| Tabel 4.7 EAR Referensi Sisi Sekunder Fasa a-b.....  | 69 |
| Tabel 4.8 EAR Referensi Sisi Sekunder Fasa a-c .....   | 70 |
| Tabel 4.9 EAR Referensi Sisi Sekunder Fasa b-c .....   | 71 |
| Tabel 4.10 EAR Referensi Sisi Sekunder Fasa a-n .....  | 72 |
| Tabel 4.11 EAR Referensi Sisi Sekunder Fasa b-n.....   | 73 |
| Tabel 4.12 EAR Referensi Sisi Sekunder Fasa c-n .....  | 74 |

Halaman ini sengaja dikosongkan



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Salah satu peralatan penting dalam proses penyaluran daya listrik ke setiap konsumen baik dari segi rumah tangga ataupun komersil adalah trafo karena alat ini merupakan salah satu alat yang berperan penting dalam mendistribusikan listrik ke beban[1]. Harganya yang sangat mahal karena perannya yang begitu vital melahirkan peralatan-peralatan pendukung untuk mengamankan aset yang sangat berharga tersebut[2]. Bila tidak, sebuah perusahaan penyalur daya listrik akan mengalami kerugian besar selain untuk mengganti trafo juga kehilangan pemasukannya karena listrik padam. Salah satu gangguan yang sering menyerang trafo adalah hubung singkat[3]. gangguan ini menyebabkan terjadinya lonjakan arus yang sangat besar yang menyebabkan belitan trafo mengalami kenaikan suhu secara drastis sehingga menyebabkan kerusakan apabila tidak segera diamankan[4]. Beberapa peneliti sedang mengembangkan metode untuk mengatasi hal tersebut salah satunya dengan mendeteksi gangguan pada trafo dengan beberapa metode yaitu *frequency response analysis* dan *sweep frequency impedance*[1], [5].

*Frequency Response Analysis (FRA)* merupakan suatu metode pada pengujian trafo dengan membandingkan besaran yang ada pada input dan output trafo[1]. Untuk mendapatkan besaran tersebut, pada bagian input trafo diberi sinyal teggangan bolak-balik sinusoidal rendah sedangkan pada sisi output diberi alat ukur untuk melihat berapa nilai yang muncul. Kedua besaran tersebut nantinya akan dibandingkan dengan nilai ketika trafo diberi gangguan hubung singkat.

Tetapi metode tersebut masih memiliki beberapa kelemahan diantaranya noise yang ditimbulkan dalam nilai *SNR (Signal to Noise Ratio)* menyebabkan kesalahan dalam perhitungan sehingga mendapatkan hasil yang tidak sesuai[5]. *SFI (Sweep Frequency Impedance)* muncul sebagai metode baru yang dinilai lebih baik dari *FRA* dilihat dari kestabilan, *SNR*, serta tingkat presisi yang lebih baik dari metode *FRA*. Hal ini salah satunya disebabkan oleh penambahan *power amplifier* untuk meningkatkan nilai *SNR* sehingga bisa menurunkan tingkat *noise*.

Karena metode *SFI* seperti penyempurnaan dari *FRA*, maka metode ini pun masih memiliki kelemahan salah satunya tingkat keakuratannya

terhadap kondisi yang sebenarnya ketika trafo benar-benar terjadi gangguan hubung singkat. Maka dari itu untuk dapat mengatasi hal tersebut terdapat suatu metode baru yang dinilai lebih akurat dan presisi karena pendekatan yang dilakukan hampir mendekati keadaan yang sesungguhnya yaitu dengan menggunakan *VSTA (Voltage Surge Test Analysis)*. Dengan *VSTA*, suatu trafo dapat dideteksi bilamana terdapat suatu gangguan hubung singkat yang terjadi pada belitannya dengan menyuplai tegangan surja sedemikian rupa pada belitan trafo lalu dengan menggunakan metode *EAR (Error Area Ratio)*, tegangan surja yang dihasilkan pada sisi sekunder trafo akan dianalisa perbedaannya ketika trafo sebelum dan sesudah diberi gangguan hubung singkat[6].

## 1.2 Permasalahan

Untuk memperoleh tegangan surja yang akan diinjeksikan ke trafo, mula-mula dibutuhkan suatu rangkaian yang dapat menaikkan tegangan dan menyearahkannya. Pada tugas akhir ini rangkaian yang digunakan adalah rangkaian *single secondary winding villard cascade*. Setelah itu, tegangan *output* dari rangkaian tersebut akan diteruskan ke rangkaian *switching* untuk mengubahnya menjadi tegangan surja dengan komponen utamanya yaitu *switch* sebagai dan kapasitor surja sehingga masalah yang muncul adalah bagaimana cara mendapatkan tegangan surja untuk diuji sesuai dengan standar yang ada lalu menguji peralatan deteksi tersebut terhadap trafo 3 fasa. Tegangan surja yang terbentuk diharapkan memiliki osilasi yang berbeda-beda ketika diinjeksikan ke trafo yang diuji pada keadaan baik maupun rusak.

Trafo yang diuji merupakan trafo 3 fasa jenis *dry type* dengan konfigurasi delta-star berkapasitas 15 kVA. Trafo tersebut akan dirusak dengan cara menghubungkan singkatkan belitannya pada *external tap* yang tersedia dengan persentase hubung singkat yang bervariasi. Hasil *output* osilasi yang muncul akan dianalisa dengan metode *L-L EAR* dan *Test-Ref EAR* sehingga permasalahan yang muncul adalah bagaimana metode tersebut dapat membedakan trafo mana yang normal dan yang sedang rusak.

## 1.3 Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai pada tugas akhir ini adalah:

1. Membuat sebuah modul pembangkitan tegangan surja yang terdiri dari pembangkitan tegangan tinggi dc dan rangkaian *switching* untuk kapasitor surja.

2. Membuat rangkaian ekivalen dari trafo pada keadaan normal dan rusak dengan cara menghubungkan belitannya lewat *external tap*
3. Menganalisis gelombang osilasi surja dari trafo yang telah dimodelkan dengan metode *EAR*
4. Mendeteksi gangguan hubung singkat pada trafo berdasarkan persentase nilai *EAR*

## 1.4 Metodologi

Dalam penulisan buku tugas akhir ini, terdapat 3 poin utama yang perlu dilakukan yaitu mendapatkan tegangan surja untuk diuji sesuai dengan standar yang ada, kedua menguji peralatan deteksi tersebut terhadap trafo 3 fasa. Ketiga, dari hasil tegangan surja yang terbentuk pada bagian *output* trafo akan dianalisis apakah tegangan surja tersebut mengindikasikan trafo dalam keadaan *short circuit* atau tidak. Maka langkah awal yang dilakukan yaitu studi literatur tentang pembangkitan tegangan surja. Tegangan surja dapat dibangkitkan dengan merangkai pembangkit tegangan tinggi dc lalu mengalirkan hasil keluarannya ke kapasitor surja dengan mekanisme *switching*. Pembangkit tegangan tinggi DC yang akan digunakan adalah *Single Secondary Winding Villard Cascade* yang merupakan penyempurnaan dari rangkaian *Cockcroft-Walton*. Setelah itu pembangkit tegangan ini dirangkai secara seri dan paralel terhadap kapasitor surja.

Sebelum melakukan pengujian alat pada trafo 3 fasa, dibuatlah model trafo yang nantinya akan diuji. Parameter yang akan digunakan yaitu jumlah belitan di setiap sisi primer atau sekunder yang digunakan untuk merusak (*short circuit*) terhadap trafo yang akan digunakan dalam perhitungan analisa tegangan surja dengan metode *EAR*. Selain itu gelombang referensi dibutuhkan untuk bisa mengidentifikasi tegangan surja yang terbentuk. Kondisi normal trafo sebelum dirusak akan dijadikan sebagai referensi. Kemudian trafo akan diberi tegangan surja dalam keadaan *short circuit* dan hasil dari tegangan surja tersebut akan dibandingkan hasilnya dengan tegangan surja sebelum trafo dalam keadaan rusak. Perbandingan dua gelombang tegangan surja tersebut akan menggunakan metode *EAR (Error Area Ratio)*. Metode ini dinilai efektif dalam analisa perbedaan tegangan surja karena sensitivitasnya yang tinggi meskipun memiliki bentuk, amplitude yang sama. Setelah semua dilakukan, maka penulisan buku tugas akhir akan menjadi langkah terakhir dalam menyusun serangkaian metode yang telah dilakukan.

## 1.5 Sistematika

Penulisan tugas akhir ini terdiri dari 5 bab yang akan diuraikan secara sistematis pada poin-poin berikut ini:

**Bab 1 : Pendahuluan**

Pada bab ini terdiri dari 6 subbab yaitu latar belakang yang merupakan dasar pemikiran terahirnya tugas akhir ini, permasalahan yang merupakan hal-hal apa saja yang akan dibahas pada tugas akhir ini, tujuan yang merupakan hal-hal yang ingin dicapai dari tugas akhir ini, metodologi yang merupakan langkah-langkah dalam pengerjaan tugas akhir, sistematika yang merupakan uraian dari isi yang ada pada tugas akhir ini, dan relevansi yang merupakan manfaat yang didapat dari tugas akhir ini.

**Bab 2 : Tinjauan Pustaka**

Pada bab ini terdiri dari beberapa teori penunjang atas hal-hal yang akan dibahas pada tugas akhir ini seperti cara membuat pembangkitan tegangan surja, standar tegangan surja, dan analisis tegangan surja dengan metode EAR.

**Bab 3 : Pemodelan Trafo dan Perancangan Sistem**

Pada bab ini akan dibahas tentang bagaimana memodelkan trafo 15 kVA dengan berbagai variasi *short circuit* yang ada untuk menjadi objek dari sistem yang telah dirancang berupa pembangkitan tegangan tinggi dc, mekanisme switching untuk membangkitkan surja dan program untuk memunculkan tegangan surja tersebut.

**Bab 4 : Deteksi Gangguan Hubung Singkat pada Trafo**

Pada bab ini membahas tentang melakukan eksperimen pada trafo menggunakan tegangan surja yang telah dibangkitkan. Lalu mengambil data berupa respon surja dari trafo dan dianalisis dengan metode EAR.

**Bab 5 : Penutup**

Pada bab ini merupakan bab terakhir yang membahas tentang kesimpulan dari eksperimen yang telah dilakukan berupa deteksi gangguan hubung singkat pada trafo dan saran-saran yang membangun agar dapat memperbaiki dan menyempurnakan untuk tugas akhir selanjutnya.

## **1.6 Relevansi**

Untuk pemerintah dan industri

Dampak yang dapat dirasa bagi badan pemerintahan yang bergerak di bidang listrik yaitu dapat menggunakan langkah-langkah yang tertulis pada tugas akhir ini untuk melakukan perawatan pada trafo mereka.

Untuk ilmu pengetahuan

Dampak yang dapat dirasa terutama bagi mahasiswa yaitu sebagai referensi atau penelitian lebih lanjut tentang tugas akhir ini tentang deteksi gangguan hubung singkat pada trafo atau pada peralatan yang lain dengan metode *EAR*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

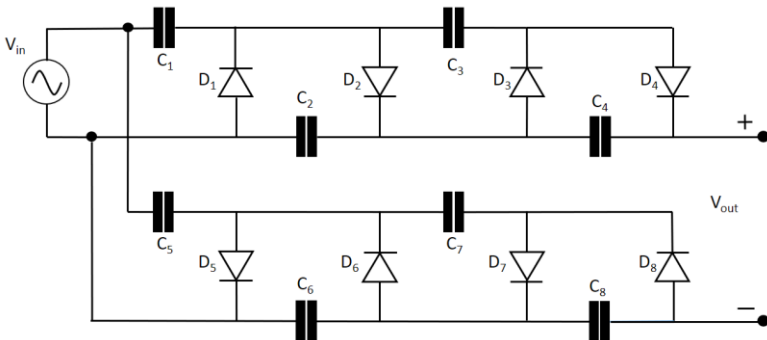
## BAB 2

### PEMBANGKITAN TEGANGAN SURJA, UJI TEGANGAN SURJA, DAN TRAFO

#### 2.1 Pembangkitan Tegangan Tinggi DC

Tegangan tinggi DC dapat digunakan sebagai pengujian-pengujian tertentu. Pada pengujian tegangan surja, tegangan tinggi DC dibutuhkan sebagai sumber sebelum nantinya diubah menjadi tegangan surja yang digunakan dalam berbagai pengujian.

Untuk membangkitkan tegangan tinggi DC terdapat beberapa modul pembangkitan yang memanfaatkan sumber dari listrik AC 220V. Salah satunya adalah modul *single secondary winding villard cascade* yang dapat dilihat pada Gambar 2.1. Modul ini merupakan hasil pengembangan dari *cockcroft-walton* yang memiliki tegangan output 2 kali lebih kecil [7]. *Output* tegangan rangkaian ini dijelaskan pada persamaan 2.1



**Gambar 2.1** Rangkaian *Single Secondary Winding Villard Cascade*

$$V_{out} = 4 \times n \times V_{peak\ input} \quad (2.1)$$

Dimana:

$V_{out}$  = Tegangan output

$n$  = jumlah stage

$V_{peak\ input}$  = Tegangan puncak input

## 2.2 Tes Surja

Tegangan surja merupakan suatu tegangan yang digambarkan berupa gelombang berjalan dan memiliki efek *destructive* pada isolasi suatu peralatan[8]. Tes surja merupakan salah satu pengujian untuk mendeteksi gangguan hubung singkat dan dinilai efektif untuk pengujian tersebut karena memiliki tingkat sensitifitas yang tinggi terhadap perubahan nilai induktansi yang diakibatkan oleh kegagalan isolasi sehingga menyebabkan gangguan hubung singkat terjadi.

Pada dasarnya prinsip tes surja yaitu dengan mengaliri arus listrik secara cepat pada sebuah belitan sehingga menghasilkan tegangan induksi pada belitan lain sesuai dengan prinsip induksi elektromagnetik yang dapat dihitung pada persamaan 2.2 berikut

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

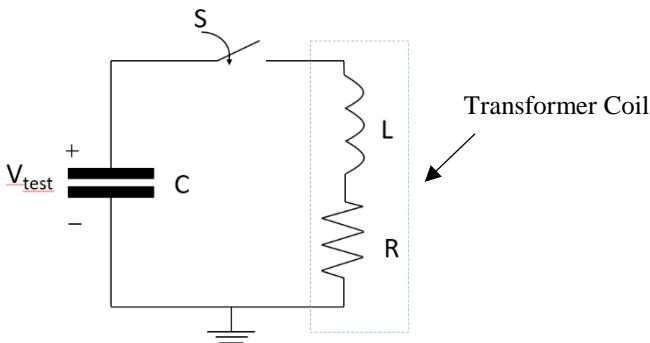
Dimana:

V = Tegangan terinduksi (V)

L = Induktansi kumparan (H)

di/dt = perubahan arus terhadap waktu

jika tegangan yang terinduksi melebihi kekuatan dielektrik isolasi yang memisahkan belitan primer dan sekunder maka loncatan elektron akan terjadi sehingga menciptakan bunga api listrik antar belitan. Maka dari itu tes surja dilakukan untuk mendeteksi indikasi kerusakan isolasi yang dapat menyebabkan hubung singkat terjadi.



**Gambar 2.2** Rangkaian Ekuivalen Pengujian Surja



Berdasarkan skematik yang diberikan pada Gambar 2.2, tegangan surja akan masuk ke belitan trafo yang akan diuji dari kapasitor surja yang *discharge* dengan sumber pembangkitan tegangan tinggi DC. Setelah mencapai nilai yang diinginkan, *switch* akan menutup dan mengalirkan muatan kapasitor ke belitan trafo yang mengakibatkan sistem seperti rangkaian RLC. Jika hubung singkat terjadi pada belitan trafo yang digambarkan seperti rangkaian RLC karena belitan memiliki sifat resistif-induktif dan terhubung dengan kapasitor surja maka frekuensi respon tegangan surja yang muncul pada belitan mengalami perubahan sesuai persamaan 2.3 berikut

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (2.3)$$

Karena nilai  $\frac{R^2}{4L^2}$  jauh lebih rendah dibanding  $\frac{1}{LC}$  maka persamaan 2.3 dapat diubah menjadi persamaan 2.4:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.4)$$

Dimana:

$f$  = frekuensi (Hz)

$R$  = jumlah resistansi rangkaian ( $\Omega$ )

$L$  = nilai induktansi belitan trafo (H)

$C$  = nilai kapasitansi kapasitor surja (F)

Sehingga apabila kegagalan isolasi terjadi yang menyebabkan hubung singkat pada belitan, maka hal tersebut dapat mudah dideteksi dengan melihat nilai induktansi pada rangkaian yang semakin menurun. Dengan kata lain pada persamaan diatas jika nilai induktansi menurun maka nilai frekuensi semakin meningkat

## 2.3 Trafo

Trafo merupakan suatu peralatan listrik yang digunakan sebagai media untuk mengirim daya dari sumber pembangkitan ke beban dengan efisiensi yang sangat besar dengan cara menaikkan tegangan (*Trafo Step-Up*) ketika daya akan dikirim melalui jalur transmisi atau distribusi dari pembangkitan dan menurunkan tegangan (*Trafo Step-Down*) ketika

sebelum sampai ke beban. Berdasarkan jenis sumbernya, trafo dibedakan menjadi 2 jenis yaitu *1-Phase Transformer* yang biasanya digunakan pada jalur distribusi daya peralatan rumah tangga yang umumnya hanya membutuhkan satu jenis tegangan saja dan *3-Phase Transformer* yang biasanya digunakan pada jalur distribusi daya pada peralatan industri-industri besar karena kapasitas daya dan variasi tegangan yang dibutuhkan pada peralatan industri berbeda-beda. Berdasarkan jenis pendinginnya, trafo dibedakan menjadi 2 jenis yaitu *dry type* yang hanya menggunakan udara sebagai pendingin sehingga tidak ada komponen berupa cairan didalamnya. Sedangkan pada jenis *wet type*, pada umumnya trafo diisi dengan cairan berupa minyak khusus sebagai media perantara sehingga panas yang ada di belitan dapat dihilangkan dengan aliran minyak khusus tersebut.

Prinsip kerja trafo adalah induksi elektromagnetik. Hal ini mengindikasikan bahwa sumber listrik yang dibutuhkan oleh trafo adalah arus AC (*Alternating Current*). Jika pada kumparan primer dialiri arus AC maka medan magnet akan terbentuk di sekeliling kumparan tersebut. Sehingga pada kumparan sekunder akan muncul tegangan sesuai dengan persamaan 2.2 berikut

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

Dimana:

V = Tegangan terinduksi (V)

L = Induktansi kumparan (H)

di/dt = perubahan arus terhadap waktu

yang besarnya berbanding terbalik dengan jumlah belitan pada kumparan primer dan berbanding lurus dengan jumlah belitan pada kumparan sekunder.

Jika dilihat dari unsur-unsur penyusun sebuah trafo, terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi besarnya induktansi pada belitan trafo yaitu jumlah belitan, luas belitan, panjang belitan, dan jenis inti yang digunakan sesuai persamaan 2.5 berikut

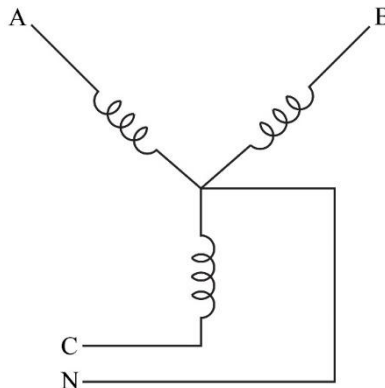
$$L = \frac{N^2 \mu_r \mu_0 A}{l} \quad (2.5)$$

Dimana:

- $L$  = Induktansi belitan (H)
- $N$  = Jumlah belitan
- $A$  = Luas belitan ( $\text{m}^2$ )
- $l$  = Panjang belitan (m)
- $\mu_r$  = Permeabilitas inti
- $\mu_0$  = Permeabilitas celah udara

Sebuah *3-Phase Transformer* dapat dibentuk dari 1 buah *3-Phase Transformer* atau penggabungan 3 buah *1-Phase Transformer*. Pada *3-Phase Transformer* terdapat 2 hal yang harus diperhatikan yaitu konfigurasi belitan dan jenis tegangan. Konfigurasi belitan ini mempengaruhi besaran tegangan yang terukur tergantung pada bagian mana tegangan tersebut diukur. Ada 3 jenis konfigurasi belitan pada *3-Phase Transformer* yaitu *Y-Connection*,  *$\Delta$ -Connection*, dan *zig-zag*. Tetapi yang umum digunakan hanya *Y-Connection* dan  *$\Delta$ -Connection*.

Pada jenis *Y-Connection*, belitan pada trafo disetiap fasanya akan dirangkai dengan saling menghubungkan ujung netral dari belitan sesuai pada gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Konfigurasi Wye

Konfigurasi ini memiliki 2 besaran tegangan yang saling berbeda dan arus yang sama besar yang akan dijelaskan pada persamaan 2.6 berikut ini[9].

$$\begin{aligned} V_{LL} &= \sqrt{3} V_{LN} \\ I_{LL} &= I_{LN} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Dimana

$V_{LL}$  = Tegangan antara *line to line* (V)

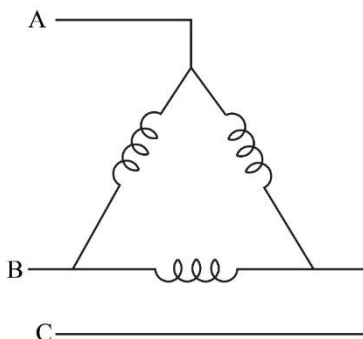
$V_{LN}$  = Tegangan antara *line to netral* (V)

$I_{LL}$  = Arus yang mengalir pada *line to line* (A)

$I_{LN}$  = Arus yang mengalir pada *line to netral* (A)

Pada jenis  $\Delta$ -Connection, belitan pada trafo disetiap fasanya akan dirangkai dengan saling menghubungkan ujung belitan sehingga akan terlihat sesuai pada gambar 2.4.

$\Delta$ -Connection justru sebaliknya yang memiliki besaran tegangan yang sama namun arus yang besarnya berbeda sesuai pada persamaan 2.7 berikut[9].



**Gambar 2.4** Konfigurasi Delta

$$\begin{aligned} V_{LL} &= V_{LN} \\ I_{LL} &= \sqrt{3} I_{LN} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Dimana

$V_{LL}$  = Tegangan antara *line to line* (V)

$V_{LN}$  = Tegangan antara *line to netral* (V)

$I_{LL}$  = Arus yang mengalir pada *line to line* (A)

$I_{LN}$  = Arus yang mengalir pada *line to netral* (A)

## 2.4 Hubung Singkat Pada Trafo

Trafo memiliki bagian isolasi yang berfungsi untuk menjaga kumparan primer dan kumparan sekunder tidak saling terhubung (*short circuit*). Penyebab suatu isolasi gagal untuk menjaga kumparan-kumparan tersebut tidak saling terhubung dibagi menjadi 2 bagian utama yaitu disebabkan kegagalan elektrik dan kegagalan mekanik. Pada umumnya, kegagalan elektrik disebabkan oleh penggunaan tegangan yang sering melebihi *rating* pada trafo dapat menyebabkan *stress* pada belitan trafo karena setiap belitan pasti memiliki batas ketahanan tertentu pada suatu nilai tegangan sehingga kegagalan isolasi pada belitan trafo dapat terjadi. Selain itu sambaran petir yang mengenai trafo tanpa pelindung seperti *lightning arrester* juga dapat menimbulkan *flashover* pada belitan sehingga mengakibatkan *short circuit*. Hal lain yang lebih mendasar adalah belitan yang biasa digunakan pada trafo terbuat dari tembaga. Sedangkan tembaga juga memiliki sifat resistif yang dapat menimbulkan rugi-rugi berupa panas. Panas ini yang dapat menyebabkan kerusakan fisik pada belitan berupa *hotspot*. Kegagalan mekanik pada trafo umumnya terjadi ketika proses pemeliharaan yang buruk, adanya getaran berlebihan, dan korosi pada belitan. Apabila *short circuit* pada trafo tidak segera dideteksi maka akan dapat menimbulkan masalah-masalah baru selain kerugian waktu untuk proses *maintenance* juga kerugian ekonomis

## 2.5 Standar Tegangan Uji Surja

Dalam menentukan standar tegangan uji surja, terdapat nilai tegangan minimal yang perlu dicapai agar tegangan mampu menembus sela udara antar belitan sehingga kondisi *short circuit* dapat dideteksi.

**Tabel 2.1** Standar Tegangan Surja

|        |          | IEEE 522  |            | EASA           |
|--------|----------|-----------|------------|----------------|
|        |          | New Coils | In Service | In Service     |
| Vline  | Per Unit | 5pu       | 75% New    | 2*Vline + 1000 |
| 190 V  | 155 V    | 776 V     | 582 V      | 1380 V         |
| 380 V  | 310 V    | 1551 V    | 1163 V     | 1760 V         |
| 480 V  | 392 V    | 1956 V    | 1467 V     | 1960 V         |
| 575 V  | 469 V    | 2347 V    | 1760 V     | 2150 V         |
| 600 V  | 490 V    | 2449 V    | 1837 V     | 2200 V         |
| 2300 V | 1878 V   | 9390 V    | 7042 V     | 5600 V         |
| 4260 V | 3397 V   | 17391 V   | 13043 V    | 9320 V         |

Berdasarkan rekomendasi IEEE 522, untuk pulsa dengan *rise time* 0-100ns tegangan yang direkomendasikan sebesar 1pu. Untuk pulsa dengan *rise time* 100ns sampai 1.2 $\mu$ s tegangan yang direkomendasikan sebesar 3.5pu. sedangkan untuk *rise time* lebih dari 1.2 $\mu$ s direkomendasikan tegangan uji sebesar 5pu[10].

Beberapa industri telah menetapkan suatu standar sebagai acuan untuk melakukan pengujian tegangan surja yang terdapat pada Tabel 2.1.

## 2.6 Metode EAR

Dalam pengujian tegangan surja, metode yang paling efektif untuk menganalisis perbedaan gelombang surja adalah metode *Error Area Ratio* (EAR) karena tingkat sensitifitasnya yang tinggi terhadap perubahan nilai gelombang surja yang terbentuk[11]. Secara matematis, persamaan metode EAR dapat ditulis pada Persamaan 2.8 dan 2.9 berikut:

$$EAR = \frac{\sum_{i=1}^N |F_i^{(1)} - F_i^{(2)}|}{\sum_{j=1}^N |F_j^{(1)}|} \times 100\% \quad (2.8)$$

$$EAR = \frac{\sum_{i=1}^N ||F_i^{(1)}| - |F_i^{(2)}||}{\sum_{j=1}^N |F_i^{(1)}|} \times 100\% \quad (2.9)$$

Dimana:

$F_i^{(1)}$  = titik ke-i pada gelombang referensi

$F_i^{(2)}$  = titik ke-i pada gelombang pengujian

Persamaan 2.9 merupakan hasil modifikasi dari Persamaan 2.8. Hal ini dikarenakan ketika pada persamaan pertama, pengurangan titik pada setiap gelombang pengujian yang terdiri dari gelombang positif, negatif dan nol jauh lebih kecil daripada gelombang referensi maka memungkinkan jumlah hasil pengurangan tersebut menghasilkan nilai *EAR* diatas 100%. Untuk itu persamaan pertama dimodifikasi agar nilai *EAR* tetap berada pada rentang 0-100%. Modifikasi persamaan tersebut dilakukan dengan memutlakkan setiap nilai pada gelombang referensi dan pengujian.

Ada 3 metode yang dilakukan dalam mencari nilai *EAR*. Yang pertama adalah *L-L (Line to Line) EAR*. Prinsip metode ini secara matematis membandingkan perbedaan gelombang surja antar fasanya. Selanjutnya *P-P (Pulse to Pulse) EAR*. Prinsip metode ini secara matematis membandingkan perbedaan gelombang pengujian terhadap gelombang pengujian sebelumnya dengan menaikkan tegangan surja secara bertahap hingga mencapai nilai maksimumnya. Berikutnya *Test-Ref EAR* yang digunakan untuk menguji belitan secara massal. Prinsip metode ini dengan membandingkan gelombang surja dari salah satu manufaktur belitan motor dengan gelombang surja belitan motor yang lain. Tabel 2.2 merupakan kriteria *pass/fail* dari ketiga metode yang dilakukan pada metode *EAR* dalam menganalisis tegangan surja[12].

**Tabel 2.2** Kriteria Pass/Fail *EAR*

|                               | <b>L-L EAR %</b>              | <b>Test-Ref %</b> |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| <b>Field,<br/>Lap Winding</b> | 10-30% of Off                 | Manufacturing     |
| <b>Field<br/>Concentric</b>   | 35-65% of Off                 | Manufacturing     |
| <b>Manufacturing</b>          | 5-15% - No<br>rotor installed | 5-15%             |
| <b>Rotor Installed</b>        | 15-65%                        | 10-25%            |

Halaman ini sengaja dikosongkan



## BAB 3

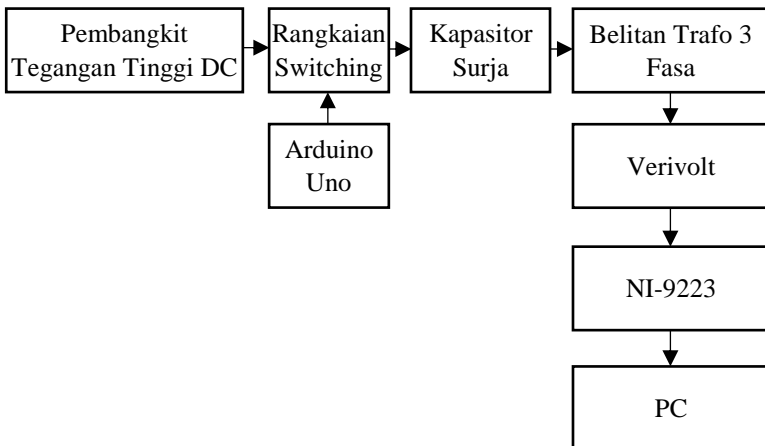
### PERANCANGAN SISTEM DAN ALAT

#### 3.1 Konfigurasi Sistem

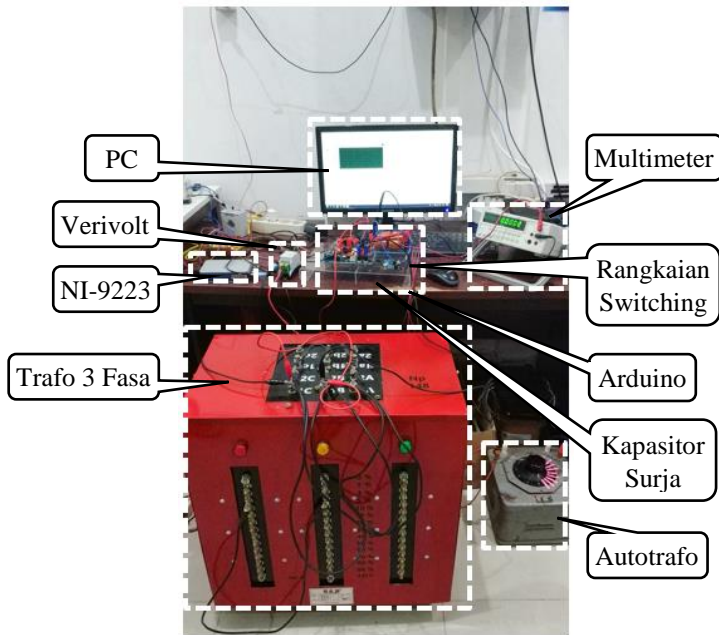
Penelitian deteksi gangguan hubung singkat dengan tes surja ini meliputi beberapa hal diantaranya adalah desain pembangkit tegangan surja, desain perancangan belitan trafo untuk variasi gangguan hubung singkat, desain *software* untuk akuisisi data, dan analisa data dari hasil pengujian yang telah dilakukan. Secara blok diagram, konfigurasi sistem dapat dilihat pada Gambar 3.1.

Pada pengujian ini terdapat beberapa komponen penting yaitu

1. *Autotrafo*
2. *Single secondary winding villard cascade*
3. Rangkaian *switching*
4. Arduino Uno sebagai *controller* rangkaian *switching*
5. Kapasitor surja
6. Sensor tegangan NI-9223
7. *Verivolt* sebagai penurun tegangan sebelum masuk ke NI-9223
8. *LabView* dan *software* lainnya untuk pengolahan data



**Gambar 3.1** Diagram Blok Konfigurasi Pengujian Surja



**Gambar 3.2** *Setup Rangkaian Pengujian Tegangan Surja*

*Autotrafo* sebagai sumber tegangan untuk menyuplai tegangan ke rangkaian pembangkit tegangan tinggi DC yaitu *single secondary winding villard cascade*. Tegangan yang telah dinaikkan akan digunakan untuk melakukan *charging* ke kapasitor surja. Rangkaian *switching* yang telah dihubungkan ke kapasitor surja terdiri dari 2 *switch* dan 1 arduino uno. Ketika mekanisme *switching* diaktifkan, Arduino akan mengirimkan sinyal ke *switch* 1 untuk menutup dengan *delay* selama 5 detik sehingga kapasitor surja akan terisi oleh tegangan tinggi DC. Setelah itu *switch* 1 akan menutup dengan selang waktu 1 mili detik dan *switch* 2 akan menutup dengan selang waktu 3 detik sehingga muatan yang ada di kapasitor surja dapat teraliri ke belitan trafo yang akan diuji seperti pada Gambar 2.2. Kemudian verivolt yang telah terhubung dengan belitan trafo akan menurunkan tegangan gelombang surja yang muncul pada belitan trafo dengan perbandingan 2000V:10V. Pada selang waktu 5 detik

sebelum *switch* 1 akan menutup, PC akan memerintahkan LabVIEW untuk merekam data menggunakan sensor tegangan NI-9223 dan menampilkan hasil gelombang surja yang muncul pada program tersebut. Setelah gelombang surja muncul, PC akan mengirimkan sinyal untuk memberhentikan perekaman data.

### 3.2 Perancangan Hardware

Perancangan hardware pada penelitian ini meliputi perancangan pembangkitan tegangan tinggi DC, rangkaian *switching* tegangan tinggi untuk mengatur kapasitor surja dengan Arduino uno, desain trafo 3 fasa dengan *external tap* untuk simulasi *turn fault*.

#### 3.2.1 Pembangkit Tegangan Tinggi DC

Pada perancangan ini melibatkan beberapa komponen yaitu sumber AC 220V, autotransformer, dan single secondary winding Villard cascade. *Autotransformer* yang menggunakan sumber AC 220V digunakan untuk menyuplai rangkaian *single secondary winding villard cascade* secara perlahan. Rangkaian tersebut terdiri dari 4 buah *stage Cockcroft-Walton* masing-masing 2 buah pada bagian atas dan 2 buah pada bagian bawah dengan 8 buah diode yang memiliki tegangan *block* maksimum 4kV dan menggunakan 8 buah kapasitor sebesar 10nF dan *rating* tegangan 2000V sehingga tegangan yang terbangkitkan sebesar +4V<sub>peak</sub> dan -4V<sub>peak</sub>. Gambar 3.4. menunjukkan implementasi dari rangkaian *single secondary winding villard cascade*.

Tegangan output maksimum pada pembangkit ini sesuai dengan persamaan 2.1, maka dengan sumber AC 220V tegangan yang dapat terbangkitkan oleh pembangkit ini secara ideal adalah

$$\begin{aligned} V_{out} &= 4 \times N \times V_{peak\ input} \\ V_{out} &= 4 \times 2 \times 220\sqrt{2} \\ &= 2489\text{ V} \end{aligned}$$

#### 3.2.2 Rangkaian *Switching*, Kapasitor Surja, dan Arduino Uno

Rangkaian *switching* ini memiliki 2 buah *switch* yang diatur oleh PC melalui arduino seperti yang terlihat pada Gambar 3.2. *Switch* 1

digunakan untuk mengisi muatan kapasitor surja sedangkan *switch* 2 digunakan untuk melepas muatan kapasitor surja ke belitan trafo.

Dalam pemilihan switch, jenis dan spesifikasi akan memberikan dampak yang sangat besar pada gelombang surja yang terbentuk. Untuk switch 1 menggunakan reed relay dan switch 2 menggunakan IGBT tipe IRGPS60B120KDP karena berdasarkan penelitian sebelumnya apabila *switch* 2 menggunakan reed relay maka gelombang surja yang terbentuk akan memiliki *noise* yang disebabkan oleh *reed relay* yang tidak bisa menutup dengan sempurna[13]. Gambar 3.3 merupakan implementasi dari rangkaian *switching* dan kapasitor surja.

Untuk membangkitkan tegangan surja, dibutuhkan kapasitor surja, reed relay dan IGBT untuk membangkitkannya. Dengan komponen switch tegangan tinggi maka kapasitor surja dapat diatur sehingga membangkitkan tegangan surja pada belitan trafo. Meskipun trafo hanya terdiri dari induktor, nilai resistansinya tetap ada karena induktansi murni hanya dapat dicapai pada keadaan ideal sehingga rangkaian keseluruhan dari kapasitor surja dan trafo adalah RLC seri seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.2.

Tabel 3.1 menjelaskan spesifikasi dari *switch* 1[14]. Sedangkan Tabel 3.2 menjelaskan spesifikasi *switch* 2. Untuk *datasheet* *switch* 1 dan *switch* 2 dapat dilihat pada lampiran.



**Gambar 3.3** Arduino Uno



**Gambar 3.4** Rangkaian Switching dan Kapasitor Surja



**Gambar 3.5** Single Secondary Winding Villard Cascade

**Tabel 3.1** Spesifikasi Reed Relay

| Contact                   | Condition     | Value |
|---------------------------|---------------|-------|
| Isolation across contact  | DC or AC peak | 10 kV |
| Maximum switching voltage | DC or AC peak | 7 kV  |
| Maximum switching current | DC or AC peak | 2 A   |
| Release time              | Diode Fitted  | 2ms   |

**Tabel 3.2** Spesifikasi IGBT

|                            | Parameter                        | Max    |
|----------------------------|----------------------------------|--------|
| $V_{CES}$                  | Collector to Emitter Voltage     | 1200 V |
| $I_C @ T_C = 25^{\circ}C$  | Continuous Collector Current     | 105 A  |
| $I_C @ T_C = 100^{\circ}C$ | Continuous Collector Current     | 60 A   |
| $I_F @ T_C = 25^{\circ}C$  | Diode Continuous Forward Current | 120 A  |
| $I_F @ T_C = 100^{\circ}C$ | Diode Continuous Forward Current | 60 A   |
| $V_{FM} @ I_C = 60 A$      | Diode Forward Voltage Drop       | 2.20 V |
| $t_d (on)$                 | Turn-On Delay Timer              | 94 ns  |

### 3.2.3 Verivolt

Verivolt merupakan sebuah alat yang dapat menurunkan nilai tegangan dengan nilai perbandingan yang linier sehingga alat ini perantara sebelum masuk ke alat ukur atau perekam data yang memiliki rating tegangan rendah. Pada penelitian ini, *Verivolt* yang digunakan bertipe DE-HB memiliki bandwidth sebesar 20 MHz, akurasi 0.2%, dengann perbandingan input output sebesar 2000V:10V sehingga dengan akurasi dan *bandwidth* sebaik itu, alat ini sangat tepat digunakan dalam pengujian tes surja yang memiliki durasi yang singkat[15]. Gambar *Verivolt* dapat dilihat pada Gambar 3.5.

### 3.2.4 Sensor Tegangan NI-9223

NI-9223 merupakan sebuah modul perekam tegangan berbasis sensor yang dapat membaca sinyal analog dan mengubahnya menjadi sinyal digital dengan frekuensi *sampling* maksimum 1MHz.

Seperti pada Gambar 3.6, Modul ini memiliki 4 *input* dengan *rating* sebesar 10V. pada penelitian ini, probe sinyal dari modul NI-9223 akan masuk terlebih dahulu ke *verivolt* karena *rating* tegangan modul ini jauh dibawah tegangan surja yang diujikan sehingga dapat merusak modul ini.



Gambar 3.6 *Verivolt*



Gambar 3.7 National Instrument - 9223

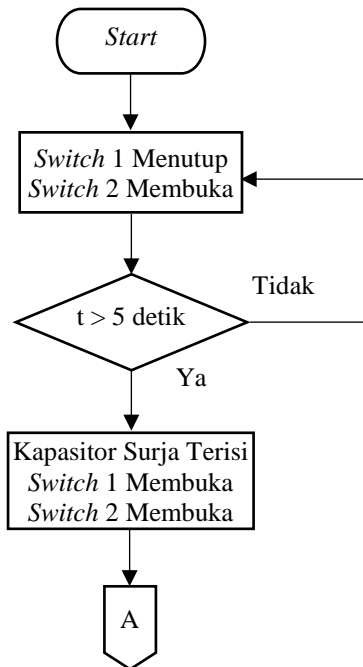
### 3.3 Perancangan Software

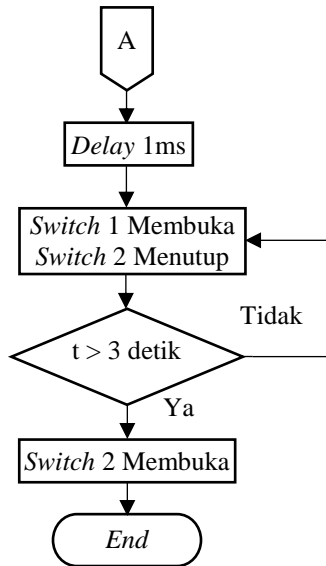
Penelitian ini menggunakan dua *software* utama dalam mengatur rangkaian *switching* untuk membangkitkan tegangan surja yaitu program arduino, dan untuk menampilkan dan menyimpan respon gelombang surja yaitu LabVIEW.

#### 3.3.1 Perancangan Program Arduino

Agar rangkaian *switching* dapat mengatur kapasitor surja sehingga membangkitkan tegangan surja, maka dibutuhkan arduino yang telah diatur oleh program. Program arduino tersebut dapat dilihat pada lampiran.

Cara kerja program arduino hingga dapat mengatur rangkaian *switching* agar membangkitkan tegangan surja dapat dilihat pada penjelesan berikut ini:





**Gambar 3.8** Flowchart Program Arduino

1. Keadaan *switch* 1 dan *switch* 2 yaitu *NO (Normally Open)*
2. Ketika arduino mendapat perintah dari PC, ia akan mengirimkan sinyal kepada *switch* 1 untuk menutup selama 5 detik dengan tujuan untuk melakukan *charging* ke kapasitor surja
3. Setelah itu, *switch* 1 akan terbuka
4. Setelah 1ms dari *switch* 1 membuka, *switch* 2 akan menutup selama 3 detik
5. Setelah *switch* 2 terbuka, arduino akan mengirimkan sinyal ke PC untuk menyatakan bahwa program telah dijalankan dengan benar.

### 3.3.2 Perancangan Program LabVIEW

Sebelum modul NI-9223 dapat membaca dan menampilkan sinyal tegangan maka diperlukan sebuah program untuk melakukan itu dengan LabVIEW. *Software* ini akan menyediakan halaman kerja untuk menggambar *diagram block* agar modul tersebut dapat bekerja sesuai yang diinginkan dari proses penampilan sinyal tegangan, perekaman data, dan direktori penyimpanan data tersebut. Program ini dapat dilihat pada lampiran.



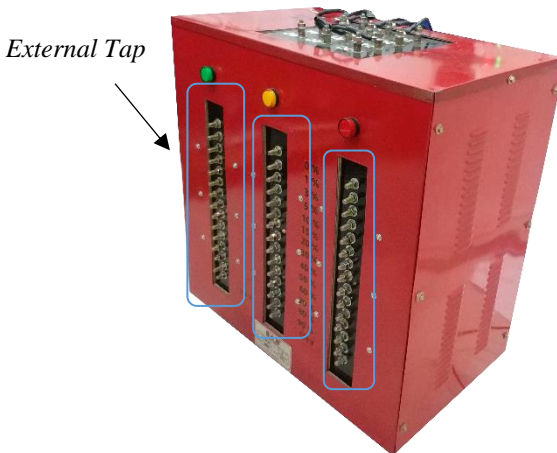
### 3.4 Perancangan Transformer

Pada penelitian ini, trafo didesain berdasarkan banyaknya *tapping* yang digunakan untuk merepresentasikan gangguan hubung singkat yang terjadi pada trafo dengan cara memberi *jumper* di setiap *external tap* yang telah disediakan seperti yang terlihat pada Gambar 3.7.

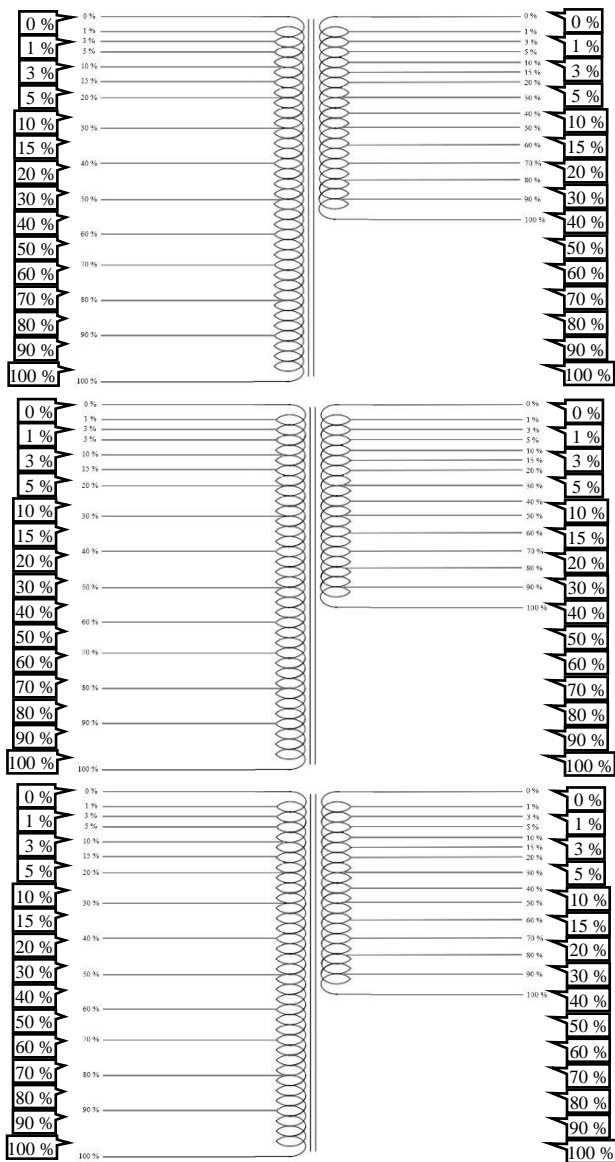
*External tap* yang ada pada trafo menunjukkan nilai antar *turn* pada setiap fasanya. Penelitian ini menggunakan trafo 3 fasa dengan 15 variasi *tapping* dari 0% - 100%, jumlah *turn* pada sisi primer sebesar 148 *turn*, sedangkan pada sisi sekunder sebanyak 74 *turn* yang diilustrasikan pada Tabel 3.3. *Turn* yang dihubungkan ke *port external tap* tidak akan sama dengan hasil perhitungan karena tingkat presisi yang tidak mencapai 100% ketika akan menghubungkan *turn* ke *port external tap*. Sebagai informasi pendukung, Tabel 3.4 menjelaskan jumlah setiap *turn* yang dihubungkan ke setiap *external tap* yang ada.

Konfigurasi pada trafo yang diuji pada penelitian ini dapat diubah-ubah sesuai keinginan karena pada *turn* 0% dan *turn* 100% dihubungkan ke *external tap* bagian atas trafo.

Pada pengujian ini, konfigurasi yang digunakan hanyalah  $\Delta - Y$  karena pada trafo-trafo distribusi, konfigurasi yang digunakan adalah  $\Delta - Y$ .



**Gambar 3.9** Trafo 3 Fasa



**Gambar 3.10** Skematik External Tap Trafo 3 Fasa

**Tabel 3.3** Spesifikasi Trafo 3 Fasa

|                          |             |
|--------------------------|-------------|
| Insulation Type          | Dry         |
| Core Type                | Z           |
| Rated Capacity           | 15000 VA    |
| High Voltage Side        | 380/220 V   |
| Low Voltage Side         | 190/110 V   |
| Frequency                | 50 Hz       |
| Turn Ratio               | 148/74 Turn |
| Tap Changing Method      | Jumper      |
| Winding Material (HV/LV) | Cu          |
| Winding Diameter         | 3.25 mm     |

**Tabel 3.4** External Tap Trafo 3 Fasa

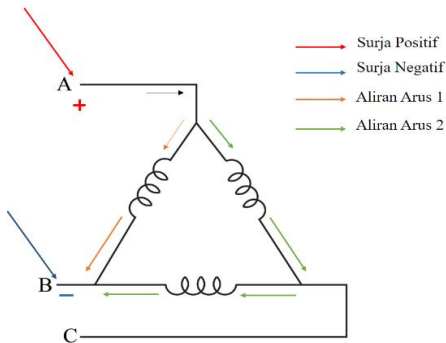
| External tap (%) | Winding voltage      |                      | Winding voltage    |                    |
|------------------|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
|                  | 110                  | 220                  | 110                | 220                |
|                  | Turn number (Design) | Turn number (Design) | Turn number (Real) | Turn number (Real) |
| 1                | 0.74                 | 1.48                 | 1                  | 2                  |
| 3                | 2.22                 | 4.44                 | 2                  | 5                  |
| 5                | 3.7                  | 7.4                  | 4                  | 8                  |
| 10               | 7.4                  | 14.8                 | 8                  | 16                 |
| 15               | 11.1                 | 22.2                 | 11                 | 22                 |
| 20               | 14.8                 | 29.6                 | 15                 | 30                 |
| 30               | 22.2                 | 44.4                 | 22                 | 44                 |
| 40               | 29.6                 | 59.2                 | 30                 | 60                 |
| 50               | 37                   | 74                   | 37                 | 74                 |
| 60               | 44.4                 | 88.8                 | 44                 | 88                 |
| 70               | 51.8                 | 103.6                | 52                 | 104                |
| 80               | 59.2                 | 118.4                | 59                 | 118                |
| 90               | 66.6                 | 133.2                | 67                 | 134                |
| 100              | 74                   | 148                  | 74                 | 148                |

### 3.4.1 Perancangan Konfigurasi Delta

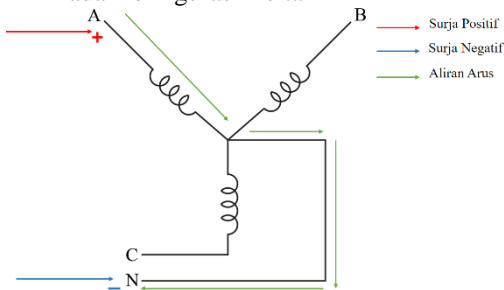
Pengujian surja pada trafo dengan konfigurasi *delta* yang semua ujung belitan terhubung dan arus akan mengalir ke seluruh belitan menggunakan kondisi *Line to Line Fault* dengan standar L-L EAR dan Test-Ref EAR. Sedangkan pada kondisi *Inter Turn Fault* menggunakan standar Test-Ref EAR. Hal ini dapat diilustrasikan pada Gambar 3.11.

### 3.4.2 Perancangan Konfigurasi Star

Pengujian surja pada konfigurasi *star* yang hanya salah satu ujung belitan yang terhubung dan arus tidak akan mengalir ke seluruh belitan menggunakan semua kondisi dan standar yang sama dengan konfigurasi *delta* karena pada konfigurasi ini. Hal ini dapat diilustrasikan pada Gambar 3.12.



**Gambar 3.11** Skematik Pengujian Surja Pada Konfigurasi Delta



**Gambar 3.12** Skematik Pengujian Surja Pada Konfigurasi Star

### 3.5 Pengujian Pembangkitan Tegangan Surja

Pada subbab ini terdapat dua pembahasan yaitu pengujian pada pembangkit tegangan tinggi DC yang menggunakan rangkaian *single secondary winding villard cascade*, pengujian *rise time* dan bentuk gelombang tegangan surja.

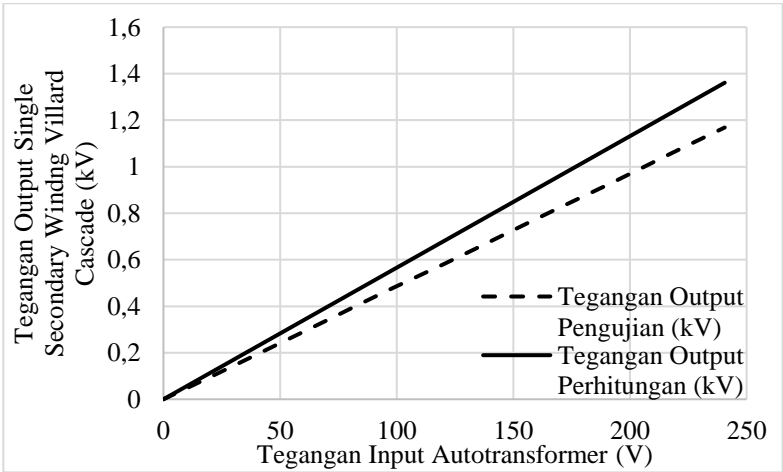
#### 3.5.1 Pengujian Rangkaian *Single Secondary Winding Villard Cascade*

Pengujian ini menggunakan sebuah *autotransformer* dengan tegangan *input* 220V dan *range* tegangan *ouput* sebesar 0-240V AC *rms* yang digunakan untuk menyuplai rangkaian *single secondary winding villard cascade*. Hasil data yang diperoleh memperlihatkan adanya perbedaan nilai tegangan output hasil pengujian dengan hasil perhitungan pada rangkaian *single secondary winding villard cascade* yang dapat dilihat pada Tabel 3.5. Hal tersebut terjadi karena terdapat *malfunction* pada sisi -4V<sub>peak</sub> atau *port negatif* dari rangkaian *single secondary winding villard cascade*.

Gambar 3.13 memperlihatkan bahwa grafik dari hasil pengujian tegangan *output* rangkaian ini terhadap hasil perhitungan dengan asumsi rangkaian ini hanya bekerja dengan 2 *stage*. Sehingga hal tersebut membuktikan terdapat *malfunction* pada sisi -4V<sub>peak</sub> atau *port negatif* dari rangkaian ini

**Tabel 3.5** Hasil Pengujian dan Perhitungan Tegangan *Ouput* Rangkaian *Single Secondary Winding Villard Cascade*

| Tegangan Input Pengujian rms (V) | Tegangan Output Pengujian (V) | Tegangan Output Perhitungan (V) |
|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 24,11                            | 115,25                        | 136,386756                      |
| 48,06                            | 231,84                        | 271,8684152                     |
| 72,24                            | 350,02                        | 408,651151                      |
| 96,15                            | 467,97                        | 543,9065361                     |
| 120,68                           | 583,5                         | 682,6691708                     |
| 144,8                            | 701,7                         | 819,1124953                     |
| 168,28                           | 816,7                         | 951,9354331                     |
| 192,12                           | 930,2                         | 1086,794838                     |
| 216,34                           | 1050,8                        | 1223,803848                     |
| 240,62                           | 1168,6                        | 1361,15227                      |



**Gambar 3.13** Perbandingan Hasil Pengujian dan Perhitungan Tegangan *Ouput* Rangkaian *Single Secondary Winding Villard Cascade*

### 3.5.2 Pengujian *rise time* Gelombang Surja

Untuk memperoleh tegangan uji yang sesuai standar IEEE 522, pengujian *rise time* perlu dilakukan. Pada Tabel 3.6 dan 3.7 hasil *rise time* yang didapatkan dari 5 kali pengujian lebih dari 1.2 $\mu$ s. Berdasarkan standar IEEE 522 untuk *rise time* lebih dari 1.2 $\mu$ s tegangan maksimal yang boleh diberikan ke belitan trafo sebesar 5pu atau 1551 V. Namun kemampuan dari peralatan pembangkit tegangan surja hanya bergantung pada keterbatasan kemampuan tegangan IGBT dalam melakukan *switching* sebesar 1200V sehingga tegangan yang diujikan ke belitan trafo di sisi primer maupun sekunder sebesar 1000V.

**Tabel 3.6** Hasil Pengukuran *Rise Time* dengan *Line to Line Fault*

| <i>Rise Time Line to Line Fault</i> ( $\mu$ s) |        |      |      |          |      |      |
|--|--------|------|------|----------|------|------|
| Jumlah Pengujian                               | Primer |      |      | Sekunder |      |      |
|  | A-B    | A-C  | B-C  | a-b      | a-c  | b-c  |
| 1  | 5,39   | 5,72 | 4,44 | 5,50     | 5,79 | 5,25 |
| 2  | 4,57   | 5,34 | 4,60 | 4,75     | 4,75 | 5,68 |
| 3  | 4,70   | 5,08 | 5,43 | 4,34     | 5,40 | 4,41 |
| 4  | 5,37   | 5,77 | 4,39 | 5,48     | 4,51 | 4,73 |
| 5  | 4,39   | 4,69 | 5,78 | 4,36     | 5,86 | 4,90 |
| Average  | 4,88   | 5,32 | 4,93 | 4,88     | 5,26 | 4,99 |

**Tabel 3.7** Hasil Pengukuran *Rise Time* dengan *Inter Turn Fault*

| <i>Rise Time Inter Turn Fault</i> ( $\mu$ s) |        |      |      |          |      |      |
|--|--------|------|------|----------|------|------|
| Jumlah Pengujian                             | Primer |      |      | Sekunder |      |      |
|  | A-B    | A-C  | B-C  | a-n      | b-n  | c-n  |
| 1  | 4,97   | 3,91 | 5,34 | 4,86     | 4,87 | 5,34 |
| 2  | 4,63   | 5,24 | 4,54 | 5,12     | 4,54 | 4,54 |
| 3  | 4,38   | 3,83 | 5,28 | 4,65     | 5,05 | 5,28 |
| 4  | 4,99   | 5,71 | 5,99 | 5,91     | 5,59 | 5,99 |
| 5  | 4,35   | 5,16 | 5,80 | 5,76     | 4,74 | 5,80 |
| Average                                      | 4,66   | 4,77 | 5,39 | 5,26     | 4,96 | 5,39 |

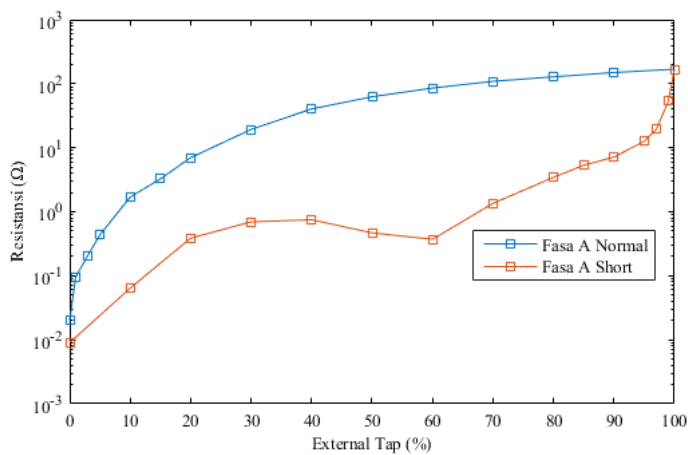
### 3.6 Pengukuran Belitan Trafo 3 Fasa

Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui nilai resistansi, induktansi, dan kapasitansi pada belitan trafo baik di sisi primer dan sekunder maupun pada setiap fasa yang berbeda dengan menggunakan LCR meter.

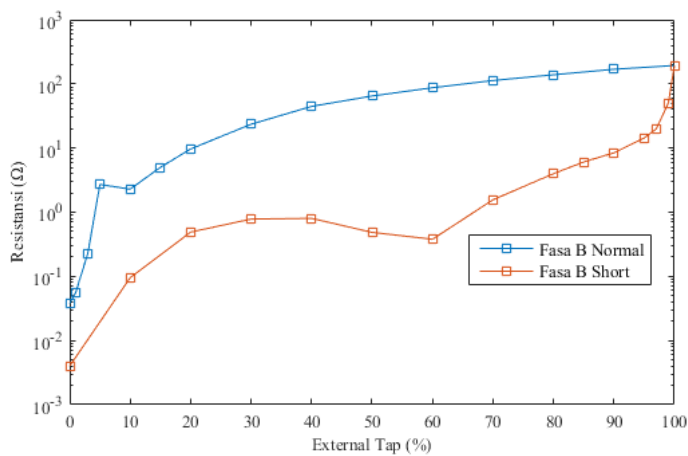
Pada pengukuran ini dilakukan dengan dua cara yang berbeda yaitu dalam kondisi normal dan dalam kondisi *short*. Pada pengujian kondisi normal dilakukan dengan cara mengukur resistansi dan induktansi di setiap external tap trafo yang ada. Sedangkan pada kondisi pengukuran dilakukan pada external tap 0% dan 100% dan memberi *jumper* pada setiap *external tap* trafo yang berbeda. Hasil pengukuran resistansi sisi primer terdapat pada Gambar 3.14 - 3.16, hasil pengukuran resistansi sisi sekunder terdapat pada Gambar 3.17 - 3.19. Lalu, hasil pengukuran induktansi sisi primer terdapat pada Gambar 3.20 - 3.22 dan hasil pengukuran induktansi sisi sekunder terdapat pada Gambar 3.23 - 3.25. Selanjutnya, hasil pengukuran kapasitansi sisi primer terdapat pada Gambar 3.26 - 3.28 dan hasil pengukuran kapasitansi sisi sekunder terdapat pada Gambar 3.29 - 3.31.

Dari hasil pengukuran pada kondisi normal, nilai induktansi dan resistansi mengalami penurunan yang seiring dengan menurunnya nilai *external tap* trafo yang ada. Namun pada pengukuran resistansi yang terlihat pada Gambar 3.17 – 3.19 terjadi perubahan nilai yang tidak linier. Hal ini diakibatkan oleh alat ukur yang tidak presisi sehingga untuk pengukuran kondisi *fault* tidak dilakukan. Sedangkan pada kondisi *fault*, perubahan nilai pada pengukuran induktansi mengalami penurunan yang signifikan.

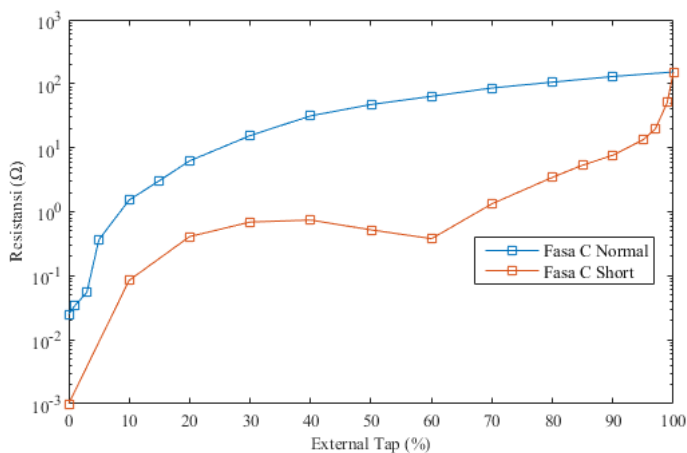




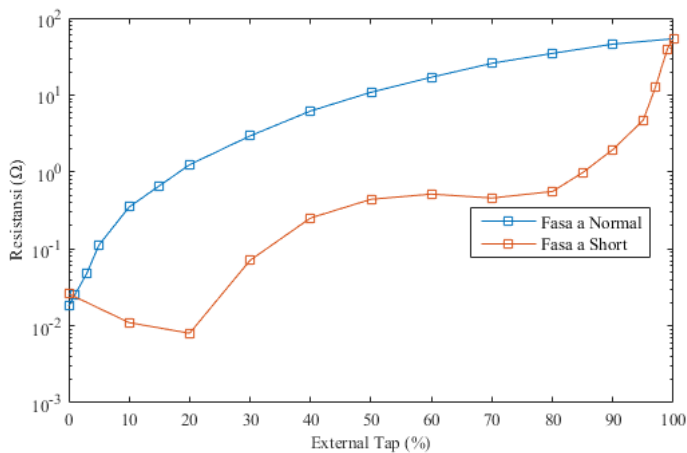
**Gambar 3.14** Nilai Resistansi Sisi Primer Fasa A



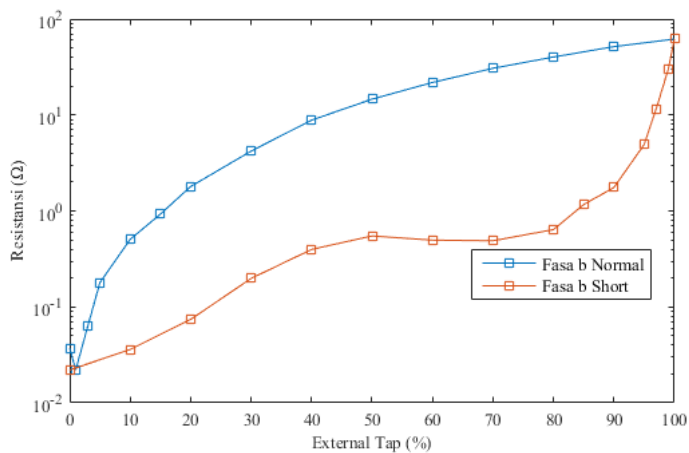
**Gambar 3.15** Nilai Resistansi Sisi Primer Fasa B



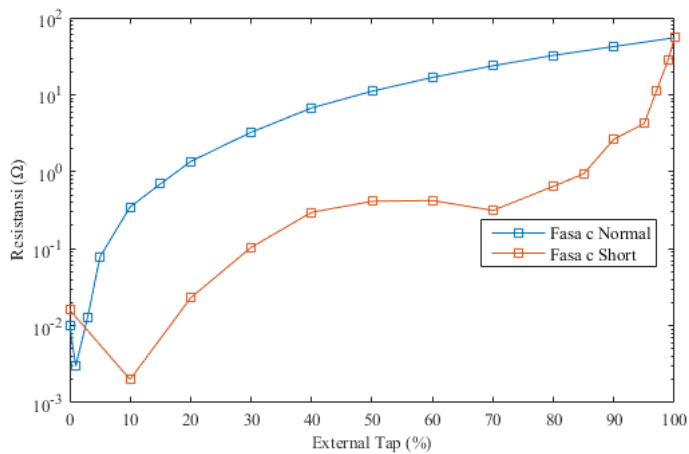
**Gambar 3.16** Nilai Resistansi Sisi Primer Fasa C



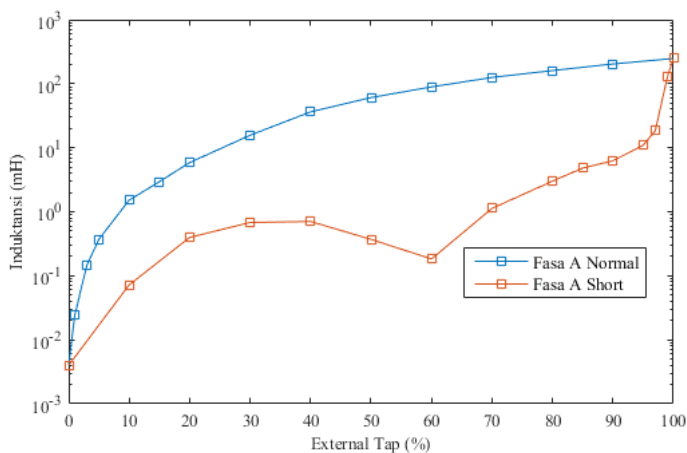
**Gambar 3.17** Nilai Resistansi Sisi Sekunder Fasa a



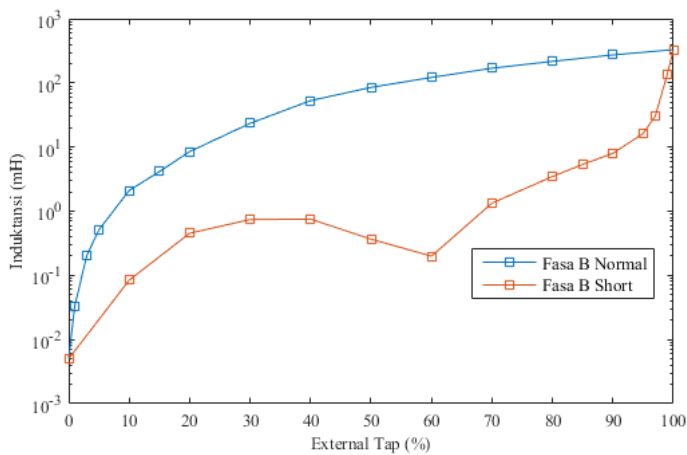
**Gambar 3.18** Nilai Resistansi Sisi Sekunder Fasa b



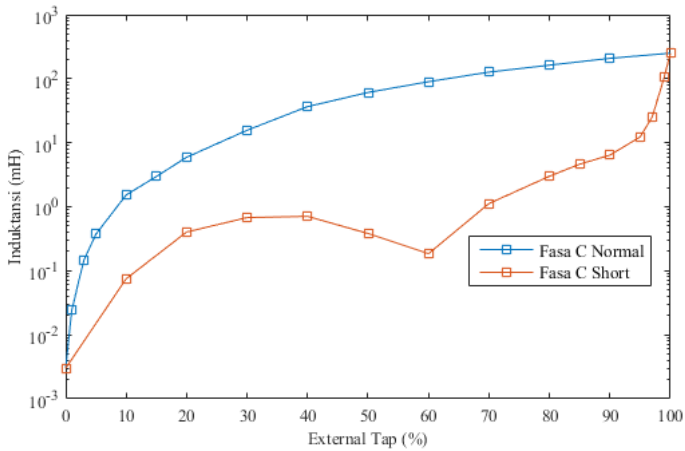
**Gambar 3.19** Nilai Resistansi Sisi Sekunder Fasa c



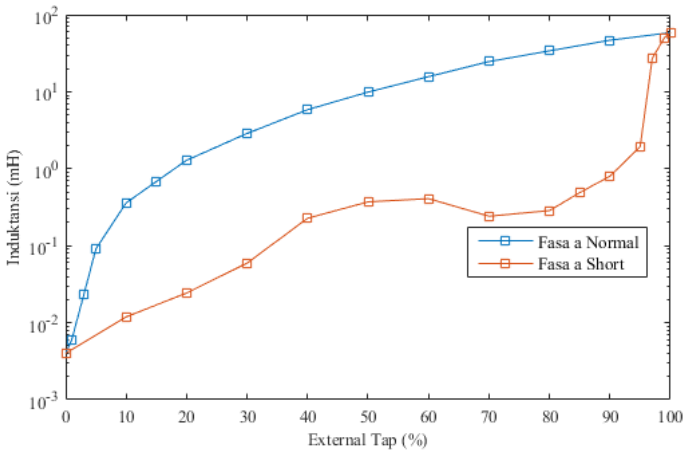
**Gambar 3.20** Nilai Induktansi Sisi Primer Fasa A



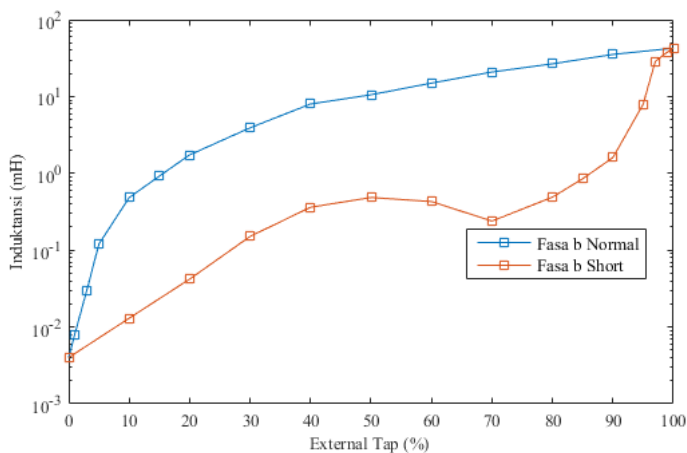
**Gambar 3.21** Nilai Induktansi Sisi Primer Fasa B



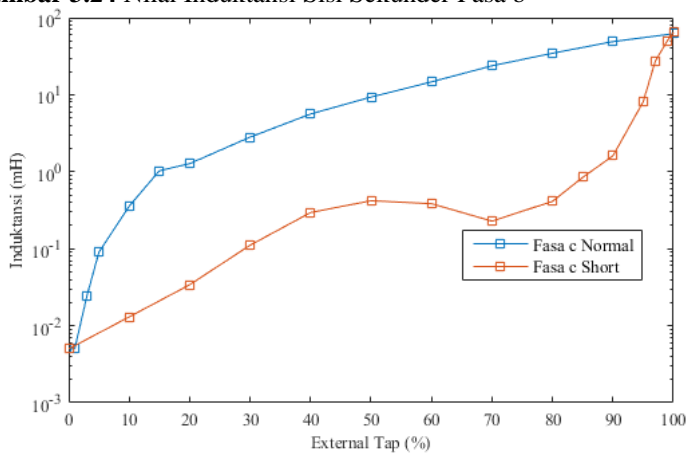
**Gambar 3.22** Nilai Induktansi Sisi Primer Fasa C



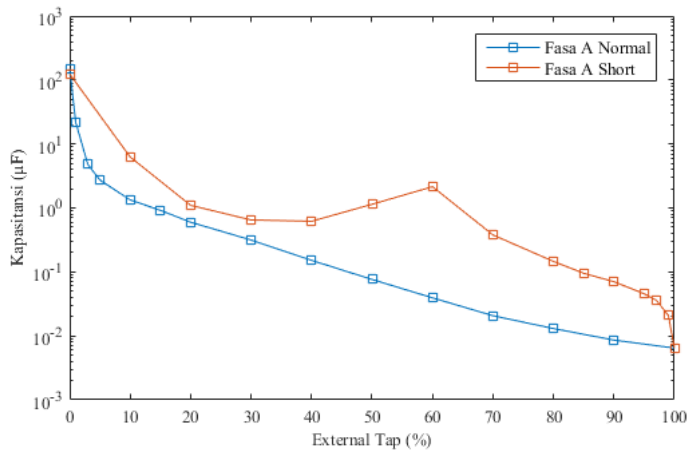
**Gambar 3.23** Nilai Induktansi Sisi Sekunder Fasa a



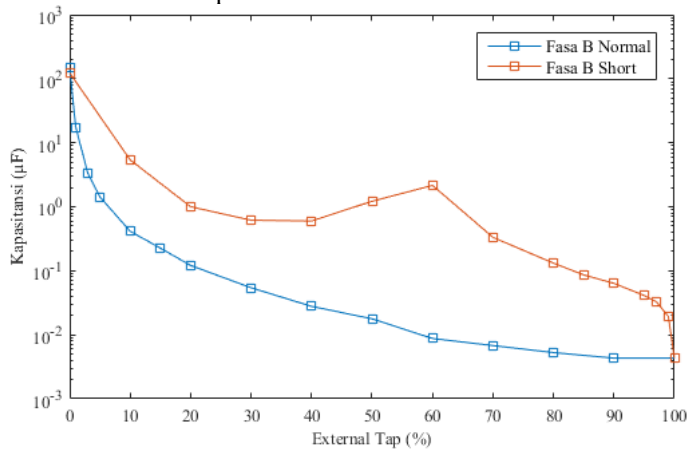
**Gambar 3.24** Nilai Induktansi Sisi Sekunder Fasa b



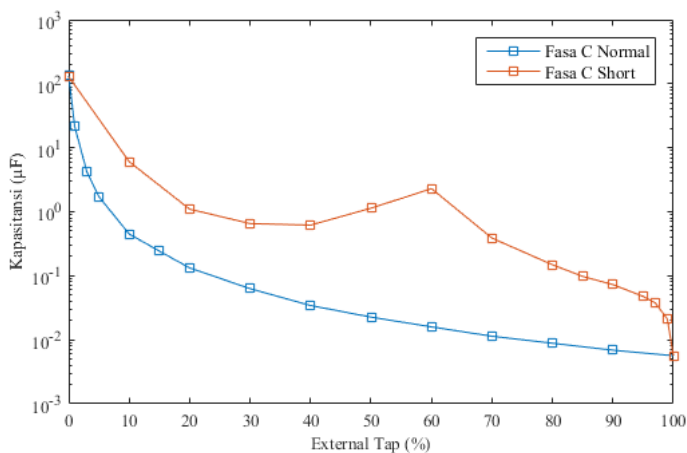
**Gambar 3.25** Nilai Induktansi Sisi Sekunder Fasa c



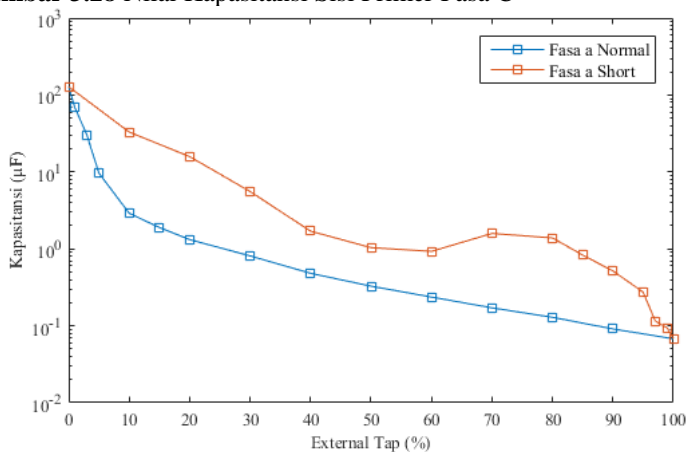
**Gambar 3.26** Nilai Kapasitansi Sisi Primer Fasa A



**Gambar 3.27** Nilai Kapasitansi Sisi Primer Fasa B

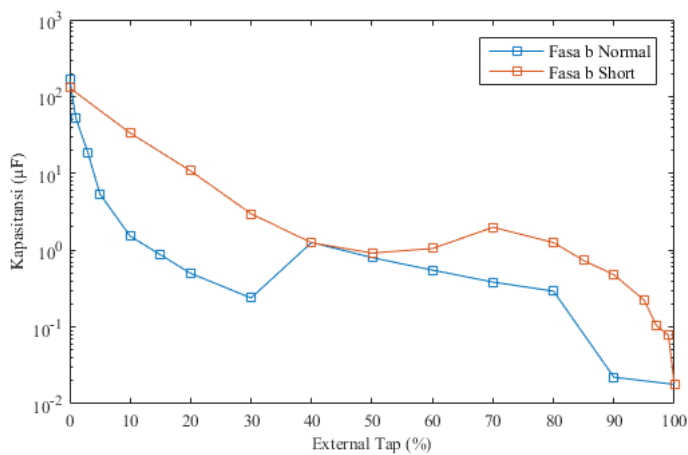


**Gambar 3.28** Nilai Kapasitansi Sisi Primer Fasa C

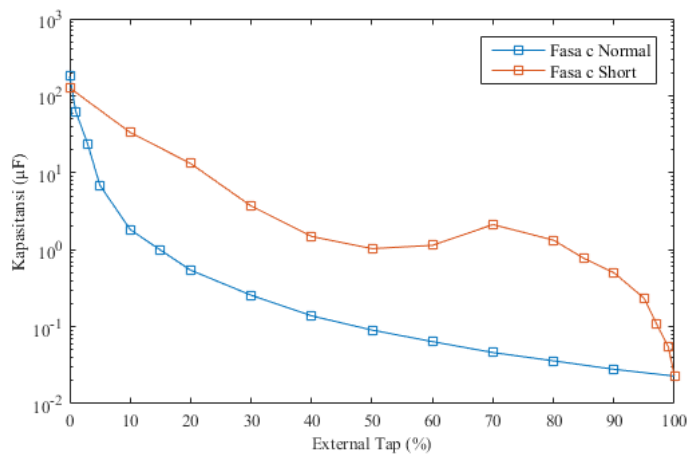


**Gambar 3.29** Nilai Kapasitansi Sisi Sekunder Fasa a





**Gambar 3.30** Nilai Kapasitansi Sisi Sekunder Fasa b



**Gambar 3.31** Nilai Kapasitansi Sisi Sekunder Fasa c

Halaman ini sengaja dikosongkan

## **BAB 4**

### **HASIL DAN ANALISIS**

#### **4.1 Hasil dan Analisis Gelombang Surja pada Konfigurasi Delta**

Pengujian ini dilakukan pada sisi primer trafo 3 fasa. Untuk setiap variasi *fault*, pengujian dilakukan sebanyak 5 kali. Dari gambar 4.1-4.18 terlihat bahwa kenaikan nilai persentase *fault* menyebabkan frekuensi gelombang surja yang dihasilkan semakin tinggi. Selain itu nilai tegangan puncak juga akan semakin menurun.

Untuk mendapatkan nilai EAR, dibutuhkan gelombang referensi yang merupakan gelombang surja pada trafo 3 fasa dalam kondisi normal sebagai pembanding dengan gelombang surja yang mengalami *fault*. Pada pengujian ini dilakukan percobaan sebanyak 5 kali masing-masing pada fasa A-B, B-C, dan A-C sebagai data gelombang surja trafo 3 fasa sisi primer dalam keadaan normal. Gelombang surja yang akan digunakan sebagai referensi di setiap fasanya diperoleh dengan membandingkan kelima gelombang tersebut terhadap dirinya sehingga didapatkan nilai rata-rata EAR dari kelima gelombang tersebut. Lalu gelombang yang akan dipilih merupakan gelombang yang memiliki nilai EAR yang mendekati nilai rata-ratanya. Dari Tabel 4.1 nilai rata-rata EAR pada fasa A-B sebesar 1.79 % sehingga berdasarkan persamaan 2.9 gelombang yang akan menjadi referensi adalah gelombang 3. Cara yang sama berlaku pada fasa lainnya sehingga pada fasa A-C yang memiliki rata-rata EAR sebesar 2.06 % gelombang referensi yang digunakan adalah gelombang 2 dan pada fasa B-C yang memiliki rata-rata EAR sebesar 0.97 % gelombang referensi yang digunakan adalah gelombang 2.

Selanjutnya, gelombang referensi akan dibandingkan dengan gelombang surja pada kondisi *fault*. Berdasarkan standar L-L EAR *Manufacturing* nilai EAR yang diizinkan sebesar 15%. Pada Gambar 4.1-4.18 yang menunjukkan nilai maksimum, rata-rata, dan minimum *EAR*, *threshold* yang dimiliki pada konfigurasi ini sesuai dengan batas standar L-L EAR *Manufacturing*. Selain itu terjadi kenaikan nilai EAR di setiap kenaikan nilai persentase *fault* yang diberikan.

**Tabel 4.1** EAR Referensi Sisi Primer Fasa A-B

| No | Perbandingan Gelombang Uji | EAR (%) |
|----|----------------------------|---------|
| 1  | 1:2                        | 2,9216  |
| 2  | 1:3                        | 2,6265  |
| 3  | 1:4                        | 3,0890  |
| 4  | 1:5                        | 3,8005  |
| 5  | 2:1                        | 2,8964  |
| 6  | 2:3                        | 0,7204  |
| 7  | 2:4                        | 0,6692  |
| 8  | 2:5                        | 1,0509  |
| 9  | 3:1                        | 2,6029  |
| 10 | 3:2                        | 0,7201  |
| 11 | 3:4                        | 0,8274  |
| 12 | 3:5                        | 1,3460  |
| 13 | 4:1                        | 3,0618  |
| 14 | 4:2                        | 0,6691  |
| 15 | 4:3                        | 0,8275  |
| 16 | 4:5                        | 0,9800  |
| 17 | 5:1                        | 3,7534  |
| 18 | 5:2                        | 1,0469  |
| 19 | 5:3                        | 1,3414  |
| 20 | 5:4                        | 0,9764  |
|    | Rata-rata                  | 1,7964  |

Pada Tabel 4.1 terlihat bahwa nilai max EAR pada fasa A-B sebesar 3.8 %, nilai minimum EAR sebesar 0.66 %, dan rata-rata EAR pada fasa A-B sebesar 1.79 % sehingga berdasarkan persamaan 2.9 dan nilai rata-rata EAR yang didapat dengan perbandingan gelombang uji 3:5 menghasilkan gelombang yang akan menjadi gelombang referensi adalah gelombang 3.

**Tabel 4.2** EAR Referensi Sisi Primer Fasa A-C

| No | Perbandingan Gelombang Uji | EAR (%) |
|----|----------------------------|---------|
| 1  | 1:2                        | 3,6752  |
| 2  | 1:3                        | 3,8546  |
| 3  | 1:4                        | 4,2504  |
| 4  | 1:5                        | 4,0146  |
| 5  | 2:1                        | 3,6782  |
| 6  | 2:3                        | 0,5885  |
| 7  | 2:4                        | 1,1084  |
| 8  | 2:5                        | 0,6653  |
| 9  | 3:1                        | 3,8459  |
| 10 | 3:2                        | 0,5867  |
| 11 | 3:4                        | 0,8916  |
| 12 | 3:5                        | 0,6194  |
| 13 | 4:1                        | 4,2267  |
| 14 | 4:2                        | 1,1013  |
| 15 | 4:3                        | 0,8886  |
| 16 | 4:5                        | 0,9712  |
| 17 | 5:1                        | 4,0106  |
| 18 | 5:2                        | 0,6641  |
| 19 | 5:3                        | 0,6202  |
| 20 | 5:4                        | 0,9756  |
|    | Rata-rata                  | 2,0618  |

Pada Tabel 4.2 terlihat bahwa nilai max EAR pada fasa A-C sebesar 4.25 %, nilai minimum EAR sebesar 0.58 %, dan rata-rata EAR pada fasa A-C sebesar 2.06 % sehingga berdasarkan persamaan 2.9 dan nilai rata-rata EAR yang didapat dengan perbandingan gelombang uji 2:4 menghasilkan gelombang yang akan menjadi gelombang referensi adalah gelombang 2.

**Tabel 4.3** EAR Referensi Sisi Primer Fasa B-C

| No | Perbandingan Gelombang Uji | EAR (%) |
|----|----------------------------|---------|
| 1  | 1:2                        | 1,1308  |
| 2  | 1:3                        | 1,3160  |
| 3  | 1:4                        | 1,7861  |
| 4  | 1:5                        | 1,8291  |
| 5  | 2:1                        | 1,1280  |
| 6  | 2:3                        | 0,4052  |
| 7  | 2:4                        | 0,7742  |
| 8  | 2:5                        | 0,8632  |
| 9  | 3:1                        | 1,3114  |
| 10 | 3:2                        | 0,4048  |
| 11 | 3:4                        | 0,5732  |
| 12 | 3:5                        | 0,6607  |
| 13 | 4:1                        | 1,7756  |
| 14 | 4:2                        | 0,7715  |
| 15 | 4:3                        | 0,5718  |
| 16 | 4:5                        | 0,3867  |
| 17 | 5:1                        | 1,8161  |
| 18 | 5:2                        | 0,8591  |
| 19 | 5:3                        | 0,6583  |
| 20 | 5:4                        | 0,3862  |
|    | Rata-rata                  | 0,9704  |

Pada Tabel 4.3 terlihat bahwa nilai max EAR pada fasa B-C sebesar 1.82 %, nilai minimum EAR sebesar 0.38 %, dan rata-rata EAR pada fasa B-C sebesar 0.97 % sehingga berdasarkan persamaan 2.9 dan nilai rata-rata EAR yang didapat dengan perbandingan gelombang uji 2:5 menghasilkan gelombang yang akan menjadi gelombang referensi adalah gelombang 2.

**Tabel 4.4** EAR Referensi Sisi Primer Fasa A

| No | Perbandingan Gelombang Uji | EAR (%) |
|----|----------------------------|---------|
| 1  | 1:2                        | 0,3456  |
| 2  | 1:3                        | 0,2969  |
| 3  | 1:4                        | 0,2815  |
| 4  | 1:5                        | 0,2584  |
| 5  | 2:1                        | 0,3452  |
| 6  | 2:3                        | 0,3440  |
| 7  | 2:4                        | 0,3140  |
| 8  | 2:5                        | 0,2258  |
| 9  | 3:1                        | 0,2969  |
| 10 | 3:2                        | 0,3444  |
| 11 | 3:4                        | 0,3234  |
| 12 | 3:5                        | 0,4179  |
| 13 | 4:1                        | 0,2809  |
| 14 | 4:2                        | 0,3137  |
| 15 | 4:3                        | 0,3227  |
| 16 | 4:5                        | 0,2633  |
| 17 | 5:1                        | 0,2579  |
| 18 | 5:2                        | 0,2256  |
| 19 | 5:3                        | 0,4171  |
| 20 | 5:4                        | 0,2634  |
|    | Rata-rata                  | 0,3069  |

Pada Tabel 4.4 terlihat bahwa nilai max EAR pada fasa A sebesar 0.41 %, nilai minimum EAR sebesar 0.22 %, dan rata-rata EAR pada fasa A sebesar 0.3 % sehingga berdasarkan persamaan 2.9 dan nilai rata-rata EAR yang didapat dengan perbandingan gelombang uji 2:4 menghasilkan gelombang yang akan menjadi gelombang referensi adalah gelombang 4.

**Tabel 4.5** EAR Referensi Sisi Primer Fasa B

| No | Perbandingan Gelombang Uji | EAR (%) |
|----|----------------------------|---------|
| 1  | 1:2                        | 0,7252  |
| 2  | 1:3                        | 1,4971  |
| 3  | 1:4                        | 1,4068  |
| 4  | 1:5                        | 1,3209  |
| 5  | 2:1                        | 0,7212  |
| 6  | 2:3                        | 0,8344  |
| 7  | 2:4                        | 0,8038  |
| 8  | 2:5                        | 0,7635  |
| 9  | 3:1                        | 1,4836  |
| 10 | 3:2                        | 0,8315  |
| 11 | 3:4                        | 0,3480  |
| 12 | 3:5                        | 0,3625  |
| 13 | 4:1                        | 1,3980  |
| 14 | 4:2                        | 0,8032  |
| 15 | 4:3                        | 0,3490  |
| 16 | 4:5                        | 0,2279  |
| 17 | 5:1                        | 1,3137  |
| 18 | 5:2                        | 0,7635  |
| 19 | 5:3                        | 0,3638  |
| 20 | 5:4                        | 0,2280  |
|    | Rata-rata                  | 0,8273  |

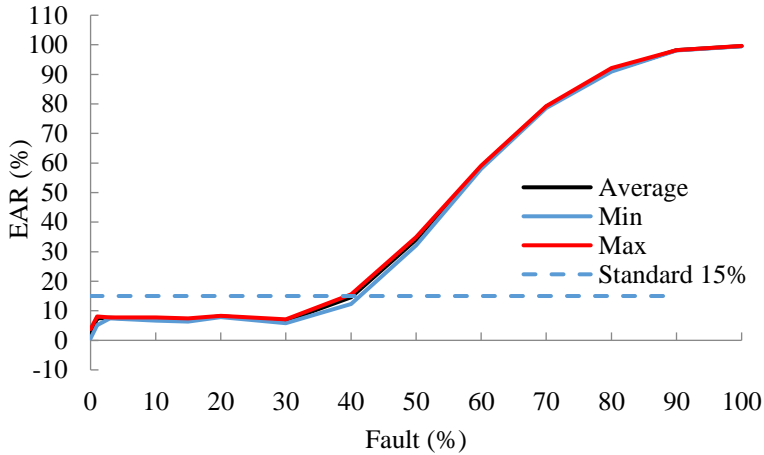
Pada Tabel 4.5 terlihat bahwa nilai max EAR pada fasa B sebesar 1.49 %, nilai minimum EAR sebesar 0.22 %, dan rata-rata EAR pada fasa B sebesar 0.82 % sehingga berdasarkan persamaan 2.9 dan nilai rata-rata EAR yang didapat dengan perbandingan gelombang uji 3:2 menghasilkan gelombang yang akan menjadi gelombang referensi adalah gelombang 3.



**Tabel 4.6** EAR Referensi Sisi Primer Fasa C

| No | Perbandingan Gelombang Uji | EAR (%) |
|----|----------------------------|---------|
| 1  | 1:2                        | 0,7799  |
| 2  | 1:3                        | 0,6877  |
| 3  | 1:4                        | 1,6408  |
| 4  | 1:5                        | 0,8161  |
| 5  | 2:1                        | 0,7768  |
| 6  | 2:3                        | 0,3549  |
| 7  | 2:4                        | 1,3861  |
| 8  | 2:5                        | 0,7244  |
| 9  | 3:1                        | 0,6866  |
| 10 | 3:2                        | 0,3557  |
| 11 | 3:4                        | 1,4165  |
| 12 | 3:5                        | 0,5476  |
| 13 | 4:1                        | 1,6264  |
| 14 | 4:2                        | 1,3793  |
| 15 | 4:3                        | 1,4064  |
| 16 | 4:5                        | 0,9722  |
| 17 | 5:1                        | 0,8125  |
| 18 | 5:2                        | 0,7240  |
| 19 | 5:3                        | 0,5461  |
| 20 | 5:4                        | 0,9765  |
|    | Rata-rata                  | 0,9308  |

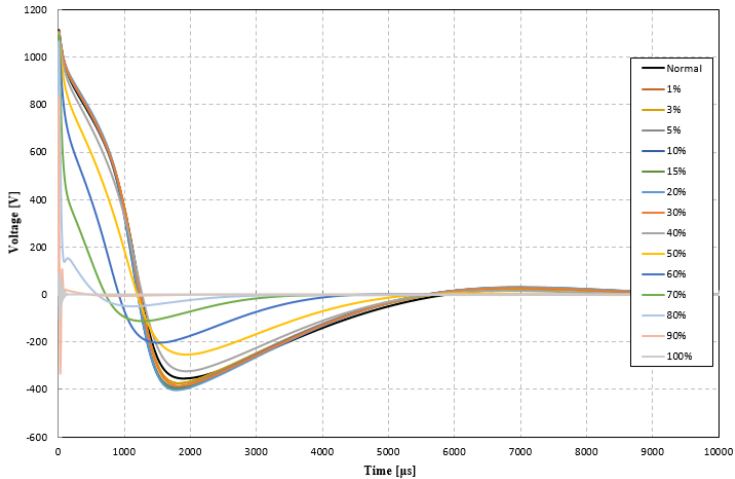
Pada Tabel 4.6 terlihat bahwa nilai max EAR pada fasa C sebesar 1.64 %, nilai minimum EAR sebesar 0.35 %, dan rata-rata EAR pada fasa C sebesar 0.93 % sehingga berdasarkan persamaan 2.9 dan nilai rata-rata EAR yang didapat dengan perbandingan gelombang uji 4:5 menghasilkan gelombang yang akan menjadi gelombang referensi adalah gelombang 4.



**Gambar 4.1** Nilai EAR Belitan Primer Fasa AB-AC, *Line to Line Fault*, L-L EAR

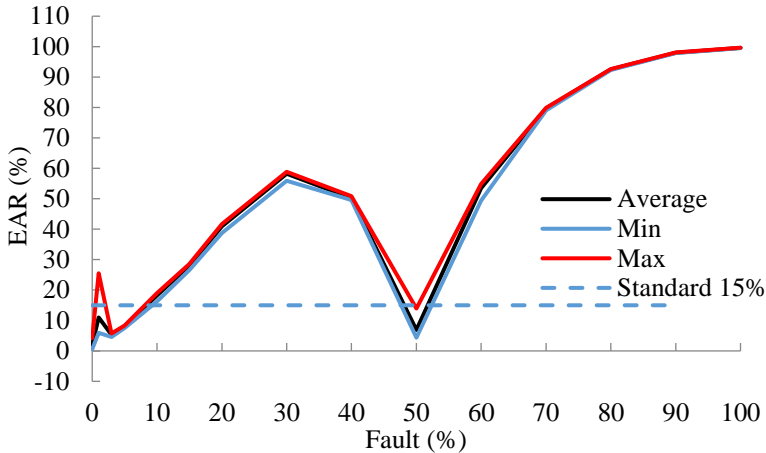
Persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.1 adalah L-L EAR *Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan *short circuit* secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 3.8%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.66%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 1.79%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan *short circuit* secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan.

Nilai EAR pada persen fault 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 7.4%, 8.06%, dan 5.2%. Nilai ini tidak mengalami peningkatan yang signifikan hingga pada fault 40% menunjukkan hasil nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 14.55%, 15.53%, 12.3% dan persen fault 90% dengan nilai EAR maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 98.24%, 98.07%, dan 98.17%,



**Gambar 4.2** Gelombang Surja Primer Fasa AB-AC, *Line to Line Fault*

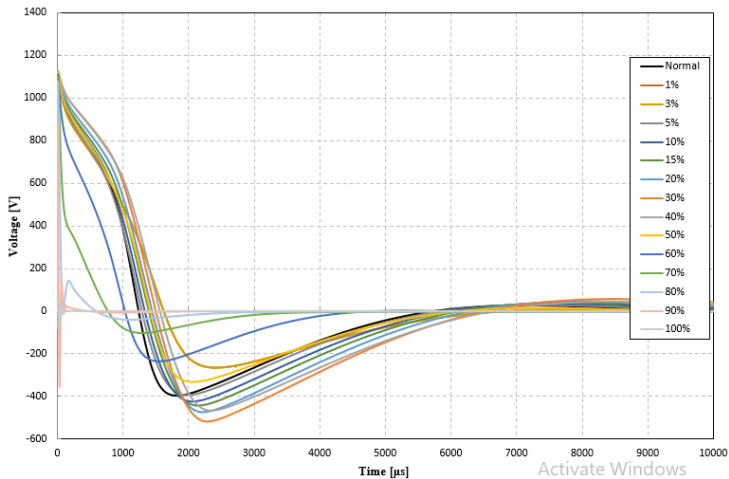
Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi fault dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan sekunder fasa AB-AC dengan skema memberi *line to line fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.2. Gelombang surja pada keadaan normal memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase fault yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.



**Gambar 4.3** Nilai EAR Belitan Primer Fasa AC-BC, *Line to Line Fault* L-L EAR

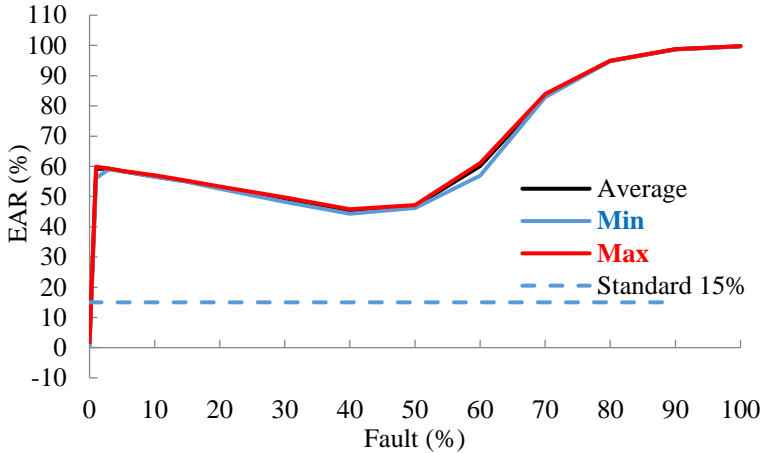
Persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.3 adalah L-L EAR *Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan *short circuit* secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 2.06%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.58%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 4.25%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan *short circuit* secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan.

Nilai EAR pada persen *fault* 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 25.54%, 5.98%, dan 10.95%. Nilai ini terus meningkat hingga pada persentase *fault* 30% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 58.9%, 55.88%, dan 58.24%. Selanjutnya, nilai EAR terus mengalami penurunan hingga pada *fault* 50% dengan nilai EAR maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 13.98%, 6.93%, dan 4.4% namun nilai tersebut mengalami peningkatan kembali hingga pada persen *fault* 90% dengan nilai EAR maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 98.1%, 97.93%, dan 98.02%.



**Gambar 4.4** Gelombang Surja Primer Fasa AC-BC, *Line to Line Fault*

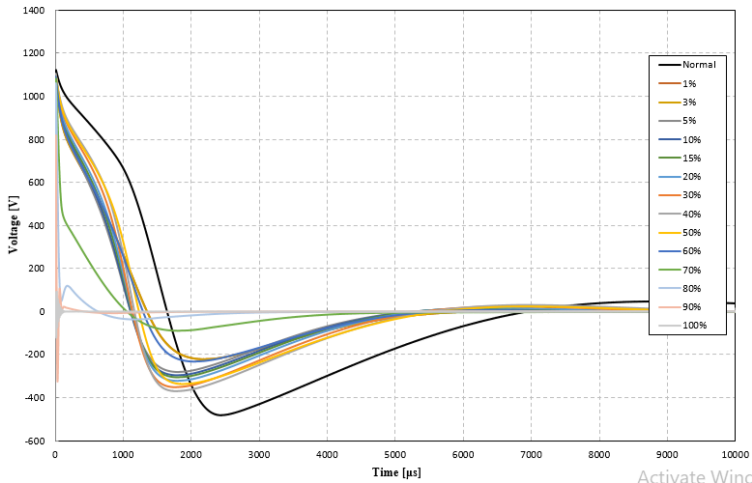
Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi fault dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan sekunder fasa AC-BC dengan skema memberi *line to line fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.4. Gelombang surja pada keadaan normal memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase fault yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.



**Gambar 4.5** Nilai EAR Belitan Primer Fasa BC-AB, *Line to Line Fault*, L-L EAR

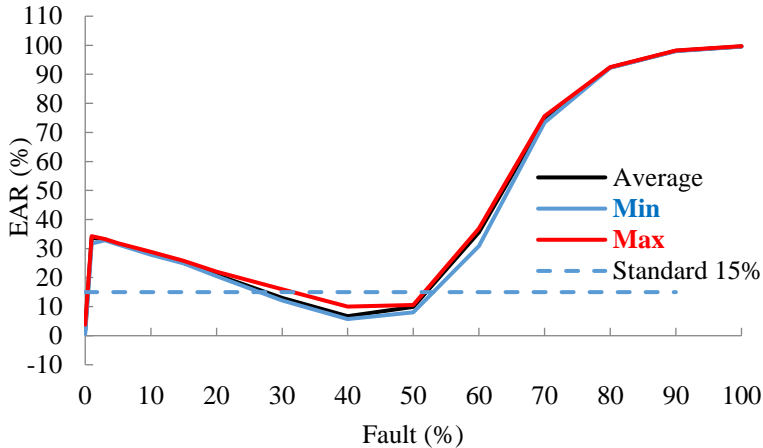
persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.5 adalah L-L EAR *Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 1.82%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.38%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 0.97%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan *short circuit* secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan.

Nilai EAR pada persen fault 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 59.92%, 56.13%, dan 59.1%. Nilai ini terus menurun hingga pada persentase fault 40% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 45.79%, 44.33%, dan 44.7% namun tetap berada diatas nilai *threshold* sehingga tetap terdeteksi sebagai gangguan. Selanjutnya, nilai EAR terus mengalami kenaikan dari persen fault 50% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 47.17%, 46.21%, dan 46.89% hingga persen fault 90% dengan nilai EAR maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 98.79%, 98.67%, dan 98.74%.



**Gambar 4.6** Gelombang Surja Primer Fasa BC-AB, *Line to Line Fault*

Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi *fault* dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan sekunder fasa BC-AB dengan skema memberi *line to line fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.6. Gelombang surja pada keadaan normal memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang surja tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase *fault* yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.

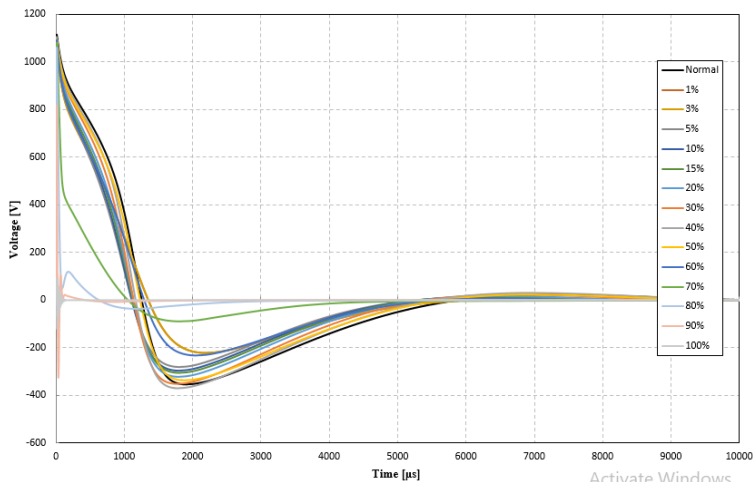


**Gambar 4.7** Nilai EAR Belitan Primer Fasa AB, *Line to Line Fault*, Test-Ref EAR

Persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.7 adalah Test-Ref EAR sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 3.8%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.66%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 1.79%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan

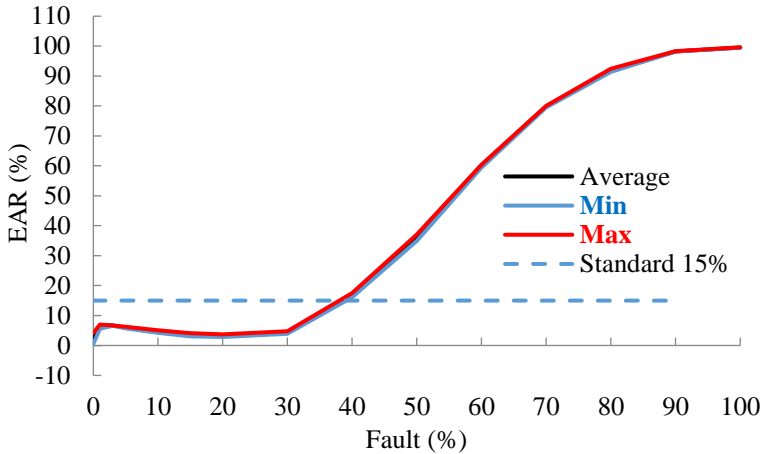
Nilai EAR pada persen fault 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 34.29%, 31.75%, dan 23.8%. Nilai ini terus menurun hingga pada persentase fault 40% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 10%, 5.76%, dan 6.7% namun tetap berada diatas nilai *threshold* sehingga tetap terdeteksi sebagai gangguan. Selanjutnya, nilai EAR terus mengalami kenaikan dari persen fault 50% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 10.56%, 8.08%, dan 9.92% hingga persen fault 90% dengan nilai EAR maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 98.17%, 97.99%, dan 98.09%,





**Gambar 4.8** Gelombang Surja Primer Fasa AB, *Line to Line Fault*

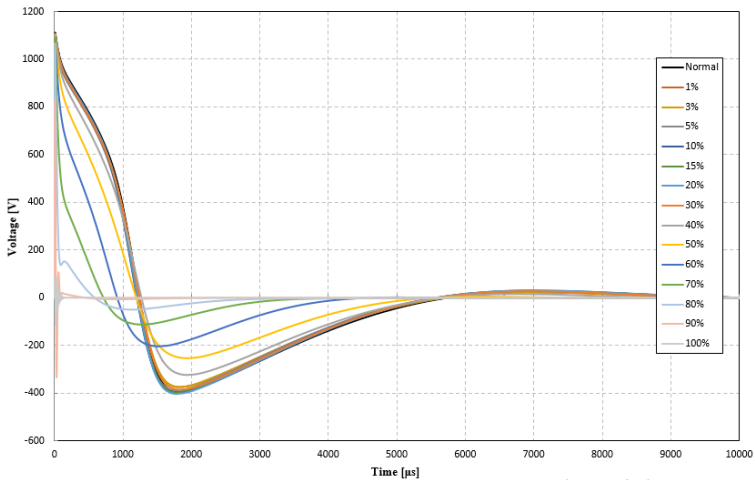
Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi fault dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan sekunder fasa AB dengan skema memberi *line to line fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.8 Gelombang surja pada keadaan normal memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang surja tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase fault yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.



**Gambar 4.9** Nilai EAR Belitan Primer Fasa AC, *Line to Line Fault*, Test-Ref EAR

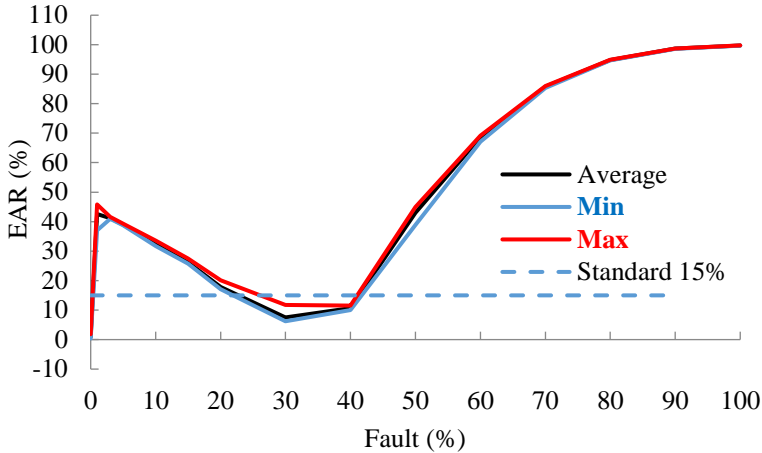
Persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.9 adalah Test-Ref EAR *Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 4.25%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.58%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 2.06%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan.

Nilai EAR pada persen fault 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 7.05%, 5.58%, dan 6.67%. Nilai ini terus menurun hingga pada persentase fault 20% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 3.71%, 2.78%, dan 3.11%. Selanjutnya, nilai EAR terus mengalami kenaikan dari persen fault 30% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 4.72%, 3.85%, dan 4.49% hingga persen fault 90% dengan nilai EAR maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 98.32%, 98.19%, dan 98.26%.



**Gambar 4.10** Gelombang Surja Primer Fasa AC, *Line to Line Fault*

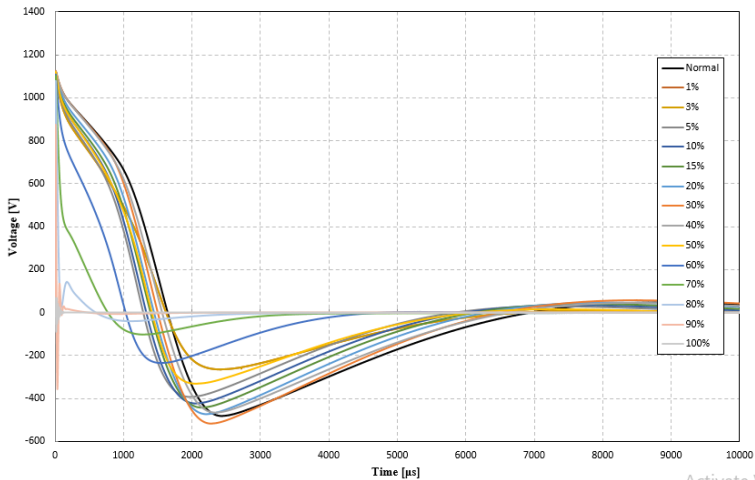
Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi fault dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan sekunder fasa A-C dengan skema memberi *line to line fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.10 Gelombang surja pada keadaan normal memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang surja tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase fault yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.



**Gambar 4.11** Nilai EAR Belitan Primer Fasa B-C, *Line to Line Fault*, Test-Ref EAR

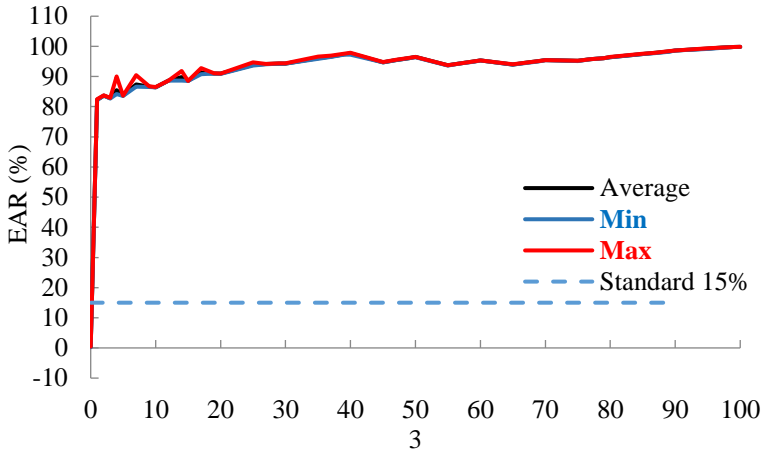
Persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.12 adalah Test-Ref EAR *Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 1.89%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.38%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 0.97%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan

Nilai EAR pada persen fault 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 45.83%, 37.08%, dan 42.58%. Nilai ini terus menurun hingga pada persentase fault 30% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 11.79%, 6.24%, dan 7.52%. Selanjutnya, nilai EAR terus mengalami kenaikan dari persen fault 40% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 11.51%, 10.06%, dan 10.63% hingga persen fault 90% dengan nilai EAR maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 98.7%, 98.5%, dan 98.64%.



**Gambar 4.12** Gelombang Surja Primer Fasa B-C, *Line to Line Fault*

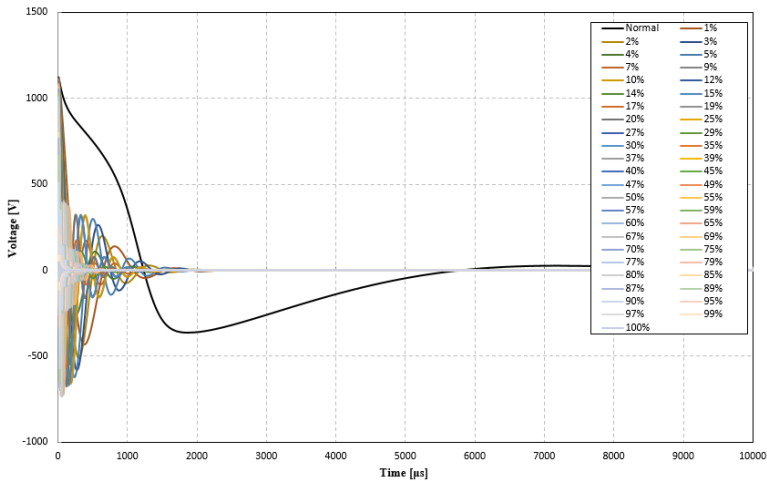
Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi fault dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan sekunder fasa B-C dengan skema memberi *line to line fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.11 Gelombang surja pada keadaan normal memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang surja tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase fault yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.



**Gambar 4.13** Nilai EAR Belitan Primer Fasa A, *Inter Turn Fault*, Test-Ref EAR

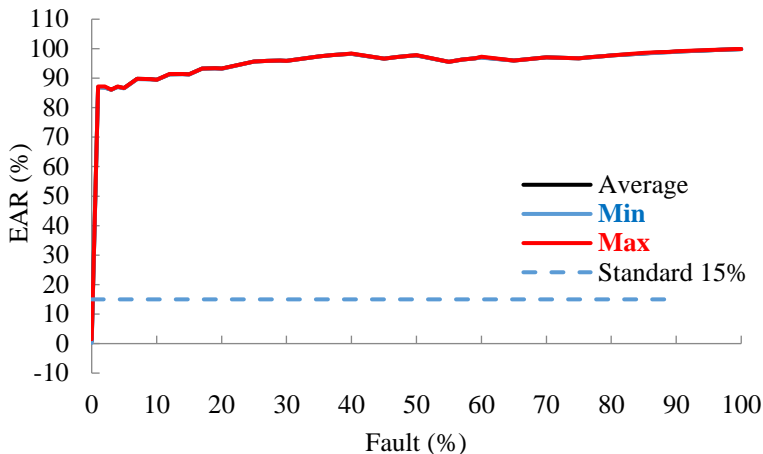
Selanjutnya, persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.14 adalah Test-Ref EAR *Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 0.41%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.22%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 0.3%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan

Nilai EAR pada persen fault 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 82.44%, 82.16%, dan 82.32%. Nilai ini terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persen fault yang diberikan meskipun perubahannya tidak linier hingga pada persentase fault 99% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 99.79%, 99.74%, dan 99.76%.



**Gambar 4.14** Gelombang Surja Primer Fasa A, *Inter Turn Fault*

Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi fault dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan primer fasa A dengan skema memberi *inter turn fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.13. Gelombang surja pada keadaan normal memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase fault yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.

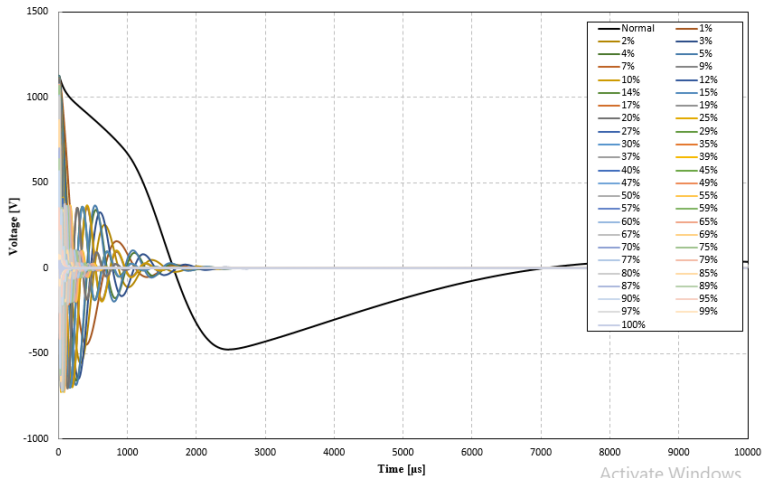


**Gambar 4.15** Nilai EAR Belitan Primer Fasa B, *Inter Turn Fault*, Test-Ref EAR

Selanjutnya, persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.16 adalah Test-Ref EAR *Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 1.49%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.22%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 0.82%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan

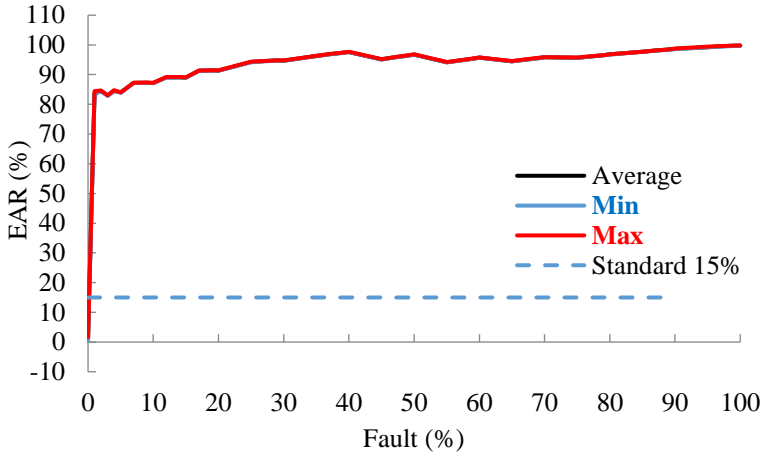
Nilai EAR pada persen fault 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 87.15%, 86.81%, dan 86.92%. Nilai ini terus meningkat seiring meningkatnya nilai persen fault yang diberikan meskipun perubahannya tidak linier hingga pada persentase fault 99% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 99.84%, 99.82%, dan 99.83%.





**Gambar 4.16** Gelombang Surja Primer Fasa B, *Inter Turn Fault*

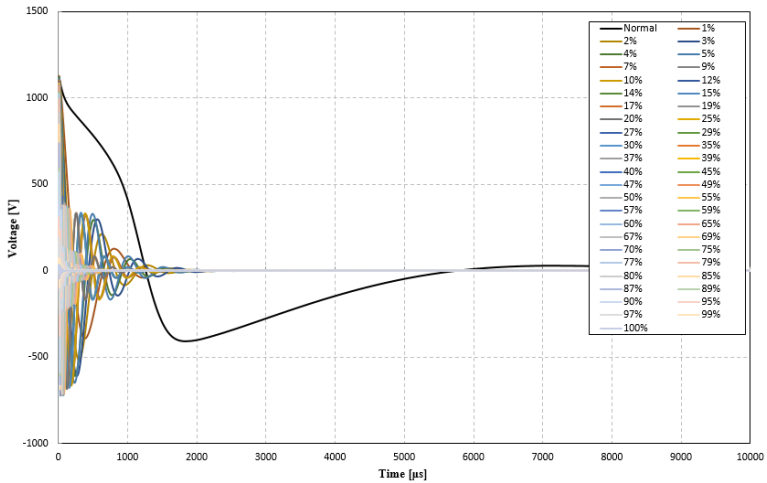
Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi fault dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan primer fasa B dengan skema memberi *inter turn fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.15. Gelombang surja pada keadaan normal memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang surja tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase fault yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.



**Gambar 4.17** Nilai EAR Belitan Primer Fasa C, *Inter Turn Fault*, Test-Ref EAR

Persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.18 adalah Test-Ref EAR *Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 1.64%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.35%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 0.93%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan

Nilai EAR pada persen fault 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 84.47%, 83.25%, dan 83.65%. Nilai ini terus meningkat hingga pada persentase fault 99% meskipun perubahannya tidak linier dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 99.76%, 99.67%, dan 99.72%.



**Gambar 4.18** Gelombang Surja Primer Fasa C, *Inter Turn Fault*

Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi fault dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan primer fasa C dengan skema memberi *inter turn fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.17. Gelombang surja pada keadaan normal memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase fault yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.

## 4.2 Hasil dan Analisis Gelombang Surja pada Konfigurasi *Star*

Untuk setiap variasi *fault*, pengujian dilakukan sebanyak 5 kali. Seperti halnya pada konfigurasi delta, dari Gambar 4.19 – 4.36 terlihat juga bahwa kenaikan nilai persentase *fault* menyebabkan frekuensi gelombang surja yang dihasilkan semakin tinggi dan nilai tegangan puncak yang akan semakin menurun.

Untuk mendapatkan nilai EAR, dibutuhkan gelombang referensi dengan 2 kondisi yaitu pada kondisi *line to line fault* dan *inter turn fault* yang merupakan gelombang surja pada trafo 3 fasa dalam kondisi normal sebagai pembanding dengan gelombang surja yang mengalami *fault*. Pada pengujian *inter turn fault* dilakukan percobaan sebanyak 5 kali masing-masing pada fasa a-n, b-n, dan c-n sebagai data gelombang surja trafo 3 fasa sisi sekunder dalam keadaan normal. Gelombang surja yang akan digunakan sebagai referensi di setiap fasanya diperoleh dengan membandingkan kelima gelombang tersebut terhadap dirinya sendiri satu per satu dengan menggunakan persamaan 2.9 sehingga didapatkan nilai rata-rata EAR dari kelima gelombang tersebut. Lalu gelombang yang akan dipilih merupakan gelombang yang memiliki nilai EAR yang mendekati nilai rata-ratanya. Dari Tabel 4.7 nilai rata-rata EAR pada fasa a-b sebesar 0.58 % sehingga berdasarkan persamaan 2.9 gelombang yang akan menjadi referensi adalah gelombang 5. Cara yang sama berlaku pada fasa lainnya sehingga pada fasa a-c yang memiliki rata-rata EAR sebesar 1.65 % gelombang referensi yang digunakan adalah gelombang 4 dan pada fasa b-c yang memiliki rata-rata EAR sebesar 0.71 % gelombang referensi yang digunakan adalah gelombang 3.

Selanjutnya untuk mendeteksi gangguan hubung singkat pada trafo 3 fasa berdasarkan nilai EAR, gelombang referensi akan dibandingkan dengan gelombang surja pada kondisi *fault*. Berdasarkan standar L-L EAR dan *Test-Ref Manufacturing* nilai EAR yang diizinkan sebesar 15% tetapi nilai tersebut tidak mutlak karena setiap peralatan memiliki nilai EAR yang berbeda-beda pada kondisi normal. Pada Gambar 4.19 – 4.36 yang menunjukkan nilai maksimum, rata-rata, dan minimum EAR, *threshold* yang dimiliki pada konfigurasi ini sesuai dengan batas standar L-L EAR dan *Test-Ref Manufacturing*. Selain itu terjadi kenaikan nilai EAR di setiap kenaikan nilai persentase *fault* yang diberikan.

**Tabel 4.7** EAR Referensi Sisi Sekunder Fasa a-b

| No | Perbandingan Gelombang Uji | EAR (%) |
|----|----------------------------|---------|
| 1  | 1:2                        | 0,8935  |
| 2  | 1:3                        | 0,9106  |
| 3  | 1:4                        | 0,9027  |
| 4  | 1:5                        | 1,1567  |
| 5  | 2:1                        | 0,8922  |
| 6  | 2:3                        | 0,1545  |
| 7  | 2:4                        | 0,2881  |
| 8  | 2:5                        | 0,4365  |
| 9  | 3:1                        | 0,909   |
| 10 | 3:2                        | 0,1544  |
| 11 | 3:4                        | 0,2295  |
| 12 | 3:5                        | 0,4547  |
| 13 | 4:1                        | 0,902   |
| 14 | 4:2                        | 0,2883  |
| 15 | 4:3                        | 0,2297  |
| 16 | 4:5                        | 0,3872  |
| 17 | 5:1                        | 1,1573  |
| 18 | 5:2                        | 0,4374  |
| 19 | 5:3                        | 0,4558  |
| 20 | 5:4                        | 0,3877  |
|    | Rata-rata                  | 0,5814  |

Pada Tabel 4.7 terlihat bahwa nilai max EAR pada fasa a-b sebesar 1.15 %, nilai minimum EAR sebesar 0.15 %, dan rata-rata EAR pada fasa a-b sebesar 0.58 % sehingga berdasarkan persamaan 2.9 dan nilai rata-rata EAR yang didapat dengan perbandingan gelombang uji 5:3 menghasilkan gelombang yang akan menjadi gelombang referensi adalah gelombang 5

**Tabel 4.8** EAR Referensi Sisi Sekunder Fasa a-c

| No | Perbandingan Gelombang Uji | EAR (%) |
|----|----------------------------|---------|
| 1  | 1:2                        | 1,4817  |
| 2  | 1:3                        | 2,3249  |
| 3  | 1:4                        | 2,646   |
| 4  | 1:5                        | 2,4151  |
| 5  | 2:1                        | 1,4748  |
| 6  | 2:3                        | 1,1827  |
| 7  | 2:4                        | 1,8044  |
| 8  | 2:5                        | 1,5564  |
| 9  | 3:1                        | 2,3112  |
| 10 | 3:2                        | 1,1812  |
| 11 | 3:4                        | 1,0314  |
| 12 | 3:5                        | 1,2393  |
| 13 | 4:1                        | 2,6358  |
| 14 | 4:2                        | 1,806   |
| 15 | 4:3                        | 1,0335  |
| 16 | 4:5                        | 0,8881  |
| 17 | 5:1                        | 2,4072  |
| 18 | 5:2                        | 1,5585  |
| 19 | 5:3                        | 1,2425  |
| 20 | 5:4                        | 0,8886  |
|    | Rata-rata                  | 1,6555  |

Pada Tabel 4.8 terlihat bahwa nilai max EAR pada fasa a-c sebesar 1.65 %, nilai minimum EAR sebesar 0.88 %, dan rata-rata EAR pada fasa a-c sebesar 2.64 % sehingga berdasarkan persamaan 2.9 dan nilai rata-rata EAR yang didapat dengan perbandingan gelombang uji 5:2 menghasilkan gelombang yang akan menjadi gelombang referensi adalah gelombang 5

**Tabel 4.9** EAR Referensi Sisi Sekunder Fasa b-c

| No | Perbandingan Gelombang Uji | EAR (%) |
|----|----------------------------|---------|
| 1  | 1:2                        | 0,602   |
| 2  | 1:3                        | 0,9185  |
| 3  | 1:4                        | 1,0499  |
| 4  | 1:5                        | 0,9106  |
| 5  | 2:1                        | 0,6001  |
| 6  | 2:3                        | 0,7591  |
| 7  | 2:4                        | 0,8779  |
| 8  | 2:5                        | 0,8587  |
| 9  | 3:1                        | 0,9134  |
| 10 | 3:2                        | 0,7573  |
| 11 | 3:4                        | 0,3688  |
| 12 | 3:5                        | 0,4767  |
| 13 | 4:1                        | 1,0438  |
| 14 | 4:2                        | 0,8756  |
| 15 | 4:3                        | 0,3687  |
| 16 | 4:5                        | 0,384   |
| 17 | 5:1                        | 0,9051  |
| 18 | 5:2                        | 0,8562  |
| 19 | 5:3                        | 0,4765  |
| 20 | 5:4                        | 0,3839  |
|    | Rata-rata                  | 0,7194  |

Pada Tabel 4.9 terlihat bahwa nilai max EAR pada fasa b-c sebesar 1.04 %, nilai minimum EAR sebesar 0.36 %, dan rata-rata EAR pada fasa b-c sebesar 0.71 % sehingga berdasarkan persamaan 2.9 dan nilai rata-rata EAR yang didapat dengan perbandingan gelombang uji 3:2 menghasilkan gelombang yang akan menjadi gelombang referensi adalah gelombang 3

**Tabel 4.10** EAR Referensi Sisi Sekunder Fasa a-n

| No | Perbandingan Gelombang Uji | EAR (%) |
|----|----------------------------|---------|
| 1  | 1:2                        | 4,6145  |
| 2  | 1:3                        | 5,2651  |
| 3  | 1:4                        | 4,6916  |
| 4  | 1:5                        | 5,1071  |
| 5  | 2:1                        | 4,5168  |
| 6  | 2:3                        | 2,1559  |
| 7  | 2:4                        | 1,6285  |
| 8  | 2:5                        | 1,0365  |
| 9  | 3:1                        | 5,0978  |
| 10 | 3:2                        | 2,1325  |
| 11 | 3:4                        | 2,8508  |
| 12 | 3:5                        | 2,0664  |
| 13 | 4:1                        | 4,5686  |
| 14 | 4:2                        | 1,6201  |
| 15 | 4:3                        | 2,8672  |
| 16 | 4:5                        | 1,7329  |
| 17 | 5:1                        | 5,0041  |
| 18 | 5:2                        | 1,0375  |
| 19 | 5:3                        | 2,0913  |
| 20 | 5:4                        | 1,7437  |
|    | Rata-rata                  | 3,0915  |

Pada Tabel 4.10 terlihat bahwa nilai max EAR pada fasa a-n sebesar 5.26 %, nilai minimum EAR sebesar 1.03 %, dan rata-rata EAR pada fasa a-n sebesar 3.09 % sehingga berdasarkan persamaan 2.9 dan nilai rata-rata EAR yang didapat dengan perbandingan gelombang uji 4:3 menghasilkan gelombang yang akan menjadi gelombang referensi adalah gelombang 4.



**Tabel 4.11** EAR Referensi Sisi Sekunder Fasa b-n

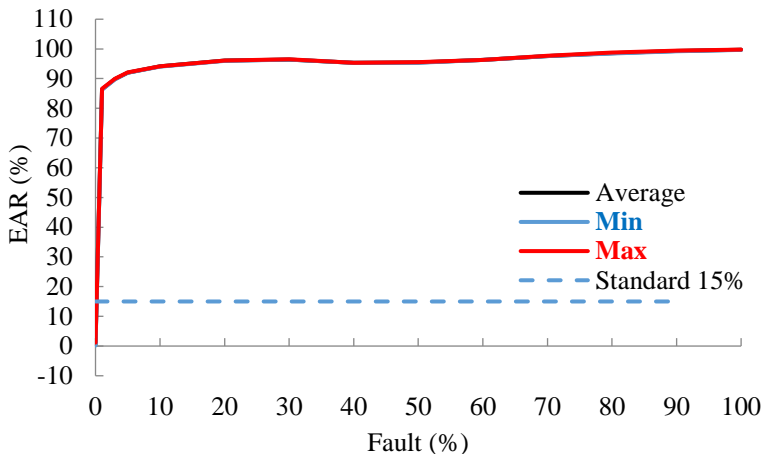
| No | Perbandingan Gelombang Uji | EAR (%) |
|----|----------------------------|---------|
| 1  | 1:2                        | 3,55    |
| 2  | 1:3                        | 0,9976  |
| 3  | 1:4                        | 1,1596  |
| 4  | 1:5                        | 1,1755  |
| 5  | 2:1                        | 3,4742  |
| 6  | 2:3                        | 3,4686  |
| 7  | 2:4                        | 2,6633  |
| 8  | 2:5                        | 2,7651  |
| 9  | 3:1                        | 0,9982  |
| 10 | 3:2                        | 3,5464  |
| 11 | 3:4                        | 1,4539  |
| 12 | 3:5                        | 1,3021  |
| 13 | 4:1                        | 1,1582  |
| 14 | 4:2                        | 2,7181  |
| 15 | 4:3                        | 1,4514  |
| 16 | 4:5                        | 0,7584  |
| 17 | 5:1                        | 1,1757  |
| 18 | 5:2                        | 2,8259  |
| 19 | 5:3                        | 1,3015  |
| 20 | 5:4                        | 0,7595  |
|    | Rata-rata                  | 1,9352  |

Pada Tabel 4.11 terlihat bahwa nilai max EAR pada fasa b-n sebesar 3.55 %, nilai minimum EAR sebesar 0.75 %, dan rata-rata EAR pada fasa A-B sebesar 1.93 % sehingga berdasarkan persamaan 2.9 dan nilai rata-rata EAR yang didapat dengan perbandingan gelombang uji 3:4 menghasilkan gelombang yang akan menjadi gelombang referensi adalah gelombang 3

**Tabel 4.12** EAR Referensi Sisi Sekunder Fasa c-n

| No | Perbandingan Gelombang Uji | EAR (%) |
|----|----------------------------|---------|
| 1  | 1:2                        | 11,939  |
| 2  | 1:3                        | 15,355  |
| 3  | 1:4                        | 17,746  |
| 4  | 1:5                        | 18,618  |
| 5  | 2:1                        | 12,162  |
| 6  | 2:3                        | 5,889   |
| 7  | 2:4                        | 8,4694  |
| 8  | 2:5                        | 9,9603  |
| 9  | 3:1                        | 15,793  |
| 10 | 3:2                        | 5,9455  |
| 11 | 3:4                        | 3,9319  |
| 12 | 3:5                        | 5,2943  |
| 13 | 4:1                        | 18,341  |
| 14 | 4:2                        | 8,5929  |
| 15 | 4:3                        | 3,9513  |
| 16 | 4:5                        | 2,7687  |
| 17 | 5:1                        | 19,352  |
| 18 | 5:2                        | 10,163  |
| 19 | 5:3                        | 5,3506  |
| 20 | 5:4                        | 2,7844  |
|    | Rata-rata                  | 10,12   |

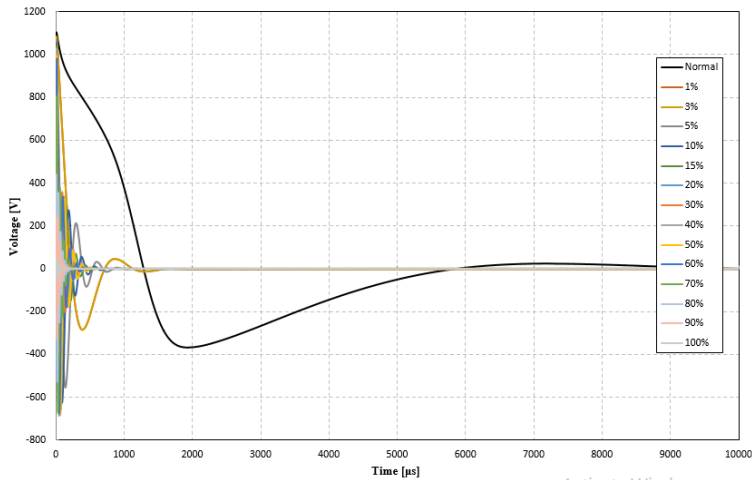
Pada Tabel 4.12 terlihat bahwa nilai max EAR pada fasa c-n sebesar 19.35 %, nilai minimum EAR sebesar 2.76 %, dan rata-rata EAR pada fasa c-n sebesar 10.12 % sehingga berdasarkan persamaan 2.9 dan nilai rata-rata EAR yang didapat dengan perbandingan gelombang uji 5:2 menghasilkan gelombang yang akan menjadi gelombang referensi adalah gelombang 5.



**Gambar 4.19** Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa ab-ac, *Line to Line Fault*, L-L EAR

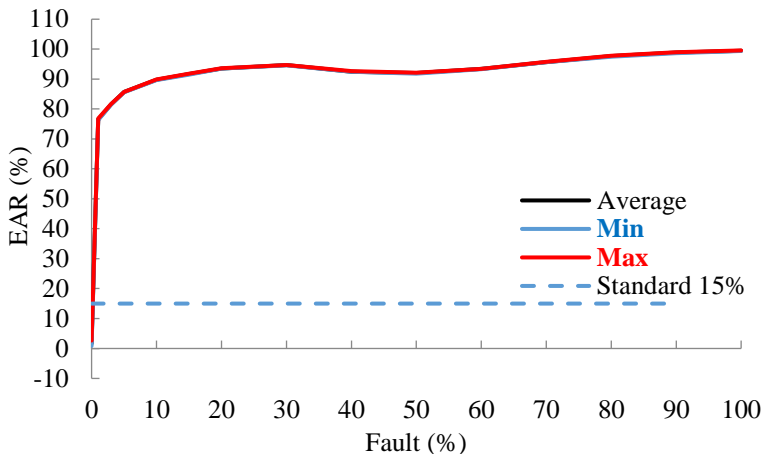
Selanjutnya, persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.19 adalah L-L EAR *Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 1.15%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.15%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 0.58%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan

Nilai EAR pada persen *fault* 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 86.58%, 86.3%, dan 86.43%. Nilai ini terus meningkat hingga pada persentase fault 90% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 99.39%, 99.17%, dan 99.28%.



**Gambar 4.20** Gelombang Surja Sekunder Fasa ab-ac, *Line to Line Fault*

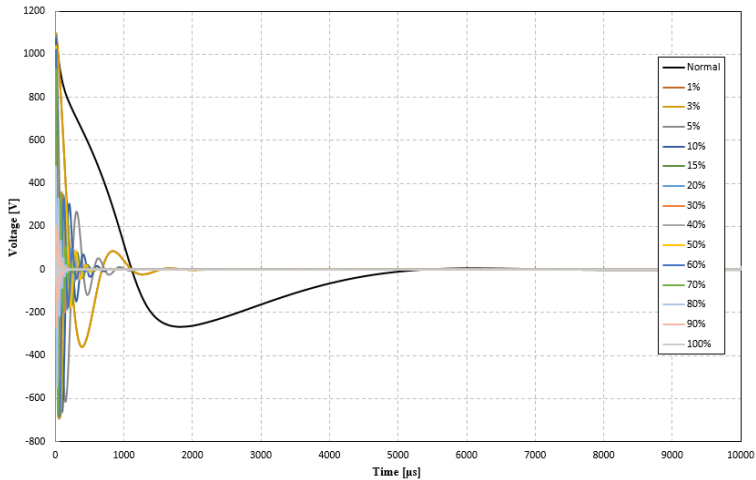
Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi *fault* dari 1% hingga 90% pada pengujian di belitan sekunder fasa ab-ac dengan skema memberi *line to line fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.20. Gelombang surja pada keadaan normal atau tanpa melakukan *short circuit* yang disengaja memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase *fault* yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.



**Gambar 4.21** Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa ac-bc, *Line to Line Fault*, L-L EAR

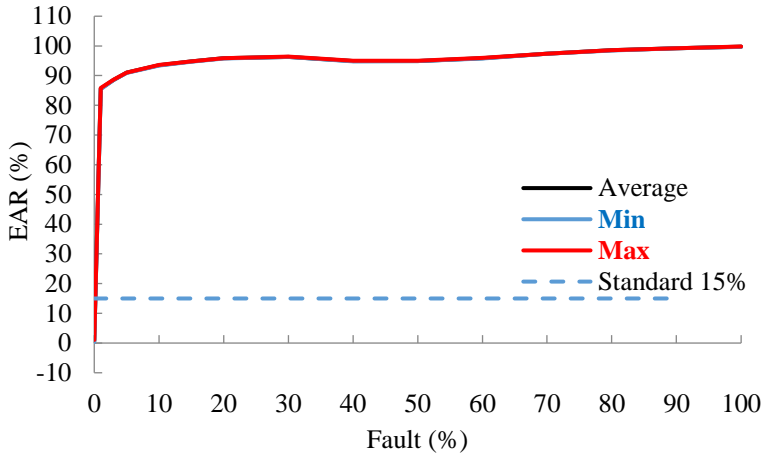
Selanjutnya, persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.21 adalah L-L EAR *Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan *short circuit* secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 2.64%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.88%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 1.65%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan *short circuit* secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan

Nilai EAR pada persen *fault* 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 76.84%, 76.28%, dan 76.46%. Nilai ini terus meningkat hingga pada persentase fault 90% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 98.98%, 98.64%, dan 98.81%.



**Gambar 4.22** Gelombang Surja Sekunder Fasa ac-bc, *Line to Line Fault*

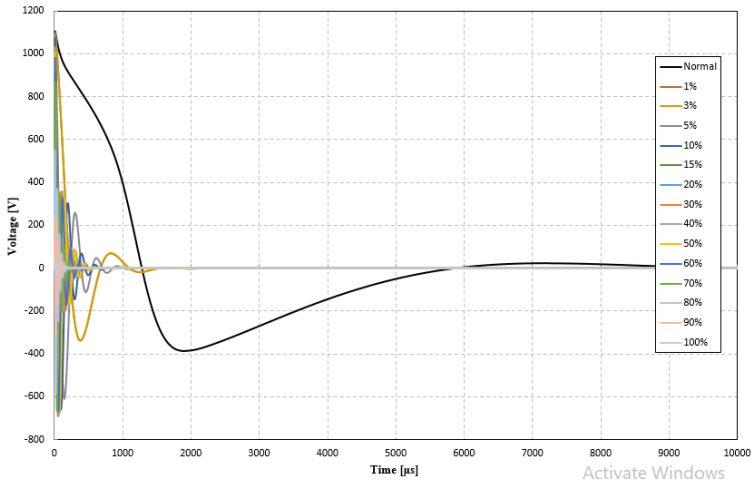
Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi *fault* dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan sekunder fasa ac-bc dengan skema memberi *line to line fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.22. Gelombang surja pada keadaan normal atau tanpa melakukan *short circuit* yang disengaja memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase *fault* yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.



**Gambar 4.23** Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa bc-ab, *Line to Line Fault*, L-L EAR

Selanjutnya, persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.23 adalah L-L EAR *Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan *short circuit* secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 1.04%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.36%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 0.71%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan *short circuit* secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan

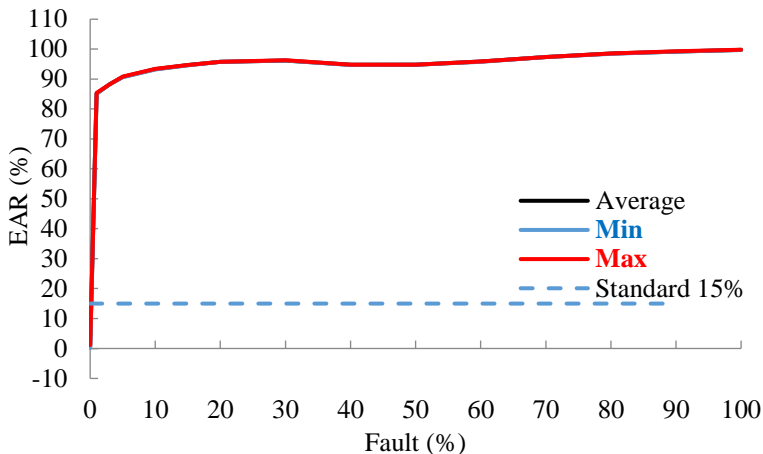
Nilai EAR pada persen *fault* 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 85.82%, 85.43%, dan 85.59%. Nilai ini terus meningkat hingga pada persentase fault 90% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 99.23%, 99.18%, dan 99.2%.



**Gambar 4.24** Gelombang Surja Sekunder Fasa bc-ab, *Line to Line Fault*

Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi *fault* dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan sekunder fasa bc-ab dengan skema memberi *line to line fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.24. Gelombang surja pada keadaan normal atau tanpa melakukan *short circuit* yang disengaja memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase *fault* yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.

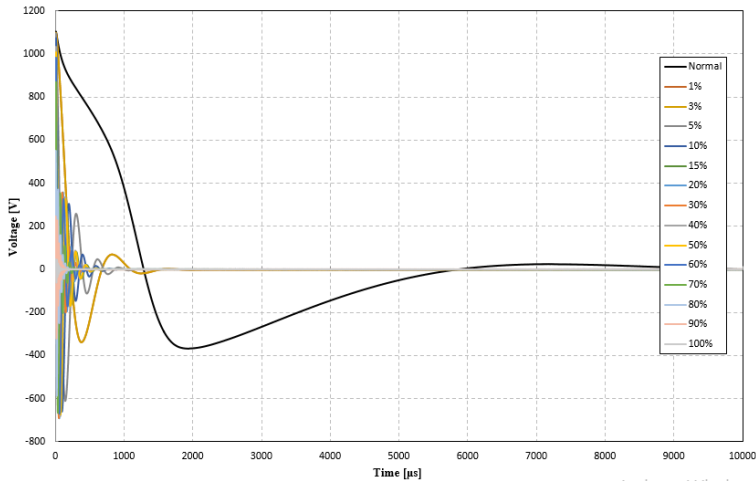




**Gambar 4.25** Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa a-b, *Line to Line Fault, Test-Ref*

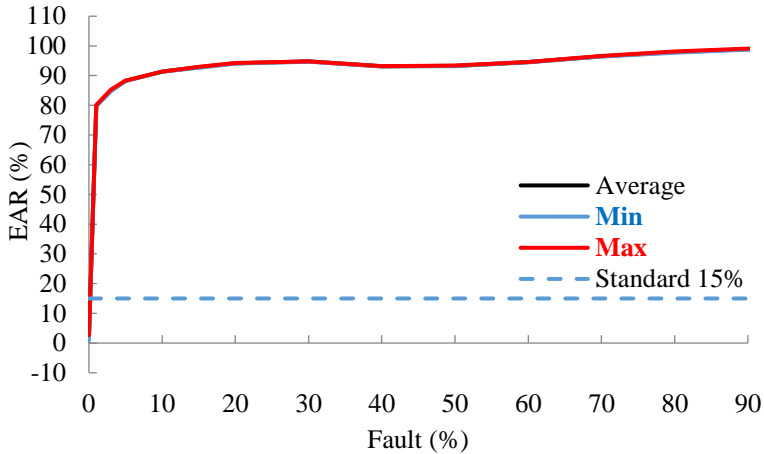
Selanjutnya, persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.25 adalah *Test-Ref* EAR Manufacturing sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 1.15%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.15%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 0.58%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan.

Nilai EAR pada persen fault 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 85.39%, 85.05%, dan 85.19%. Nilai ini terus mengalami kenaikan hingga persen *fault* 90% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 99.26%, 99.19%, dan 99.21%.



**Gambar 4.26** Gelombang Surja Sekunder Fasa a-b, *Line to Line Fault*

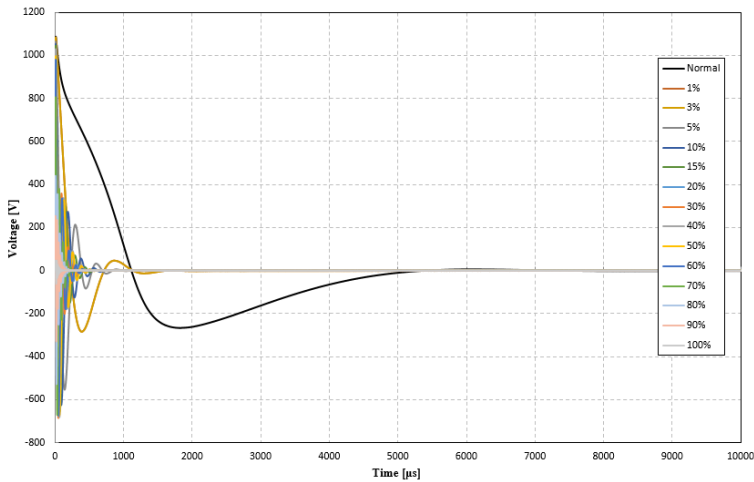
Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi *fault* dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan sekunder fasa a-b dengan skema memberi *line to line fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.26. Gelombang surja pada keadaan normal atau tanpa melakukan *short circuit* yang disengaja memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase *fault* yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.



**Gambar 4.27** Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa a-c, *Line to Line Fault, Test-Ref*

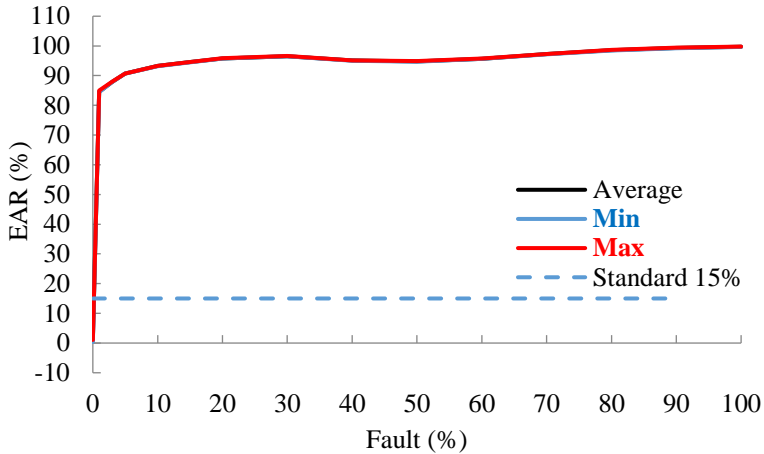
Selanjutnya, persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.27 adalah *Test-Ref EAR Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan *short circuit* secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 2.64%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.88%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 1.65%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan *short circuit* secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan kecuali pada nilai EAR maksimum.

Nilai EAR pada persen *fault* 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 80.1%, 79.7%, dan 79.92%. Nilai ini terus mengalami kenaikan hingga persen *fault* 90% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 99.1%, 98.77%, dan 98.93% yang tetap berada diatas nilai *threshold* sehingga tetap terdeteksi sebagai gangguan.



**Gambar 4.28** Gelombang Surja Sekunder Fasa a-c, *Line to Line Fault*

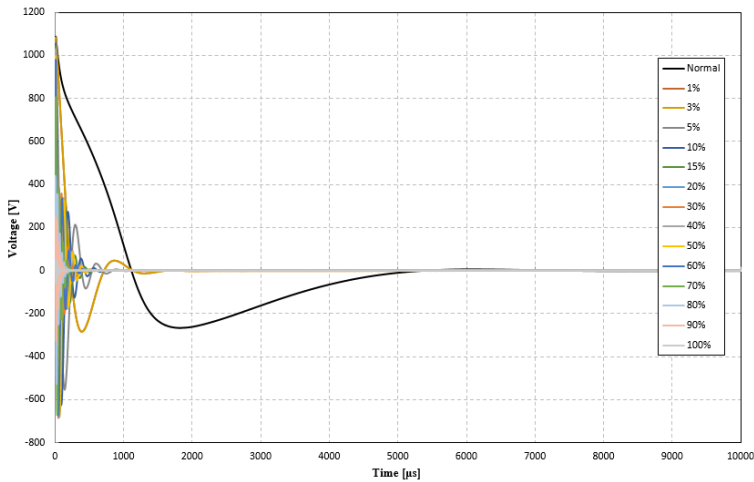
Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi *fault* dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan sekunder fasa a-c dengan skema memberi *line to line fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.28. Gelombang surja pada keadaan normal atau tanpa melakukan *short circuit* yang disengaja memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase fault yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.



**Gambar 4.29** Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa b-c, *Line to Line Fault, Test-Ref*

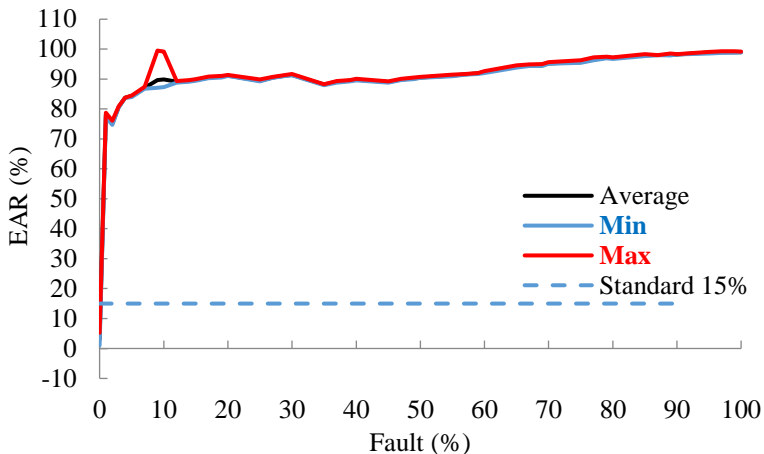
Selanjutnya, persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.29 adalah *Test-Ref EAR Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan *short circuit* secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 1.04%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.36%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 0.71%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan *short circuit* secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan.

Nilai EAR pada persen fault 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 84.94%, 84.43%, dan 84.59%. Nilai ini terus mengalami kenaikan hingga persen *fault* 90% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 99.4%, 99.23%, dan 99.31%.



**Gambar 4.30** Gelombang Surja Sekunder Fasa b-c, *Line to Line Fault*

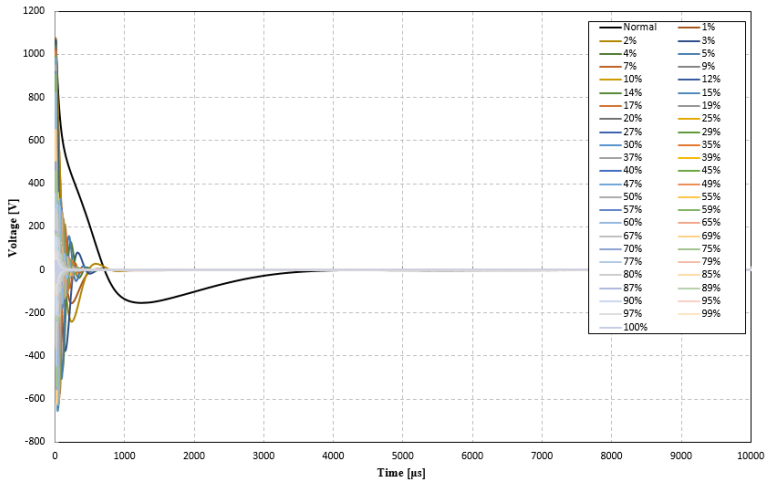
Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi *fault* dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan sekunder fasa b-c dengan skema memberi *line to line fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.30. Gelombang surja pada keadaan normal atau tanpa melakukan *short circuit* yang disengaja memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase *fault* yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.



**Gambar 4.31** Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa a-n, *Inter Turn Fault*, *Test-Ref*

Selanjutnya, persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.31 adalah *Test-Ref EAR Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 5.26%, untuk nilai minimum EAR sebesar 1.03%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 3.09%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan

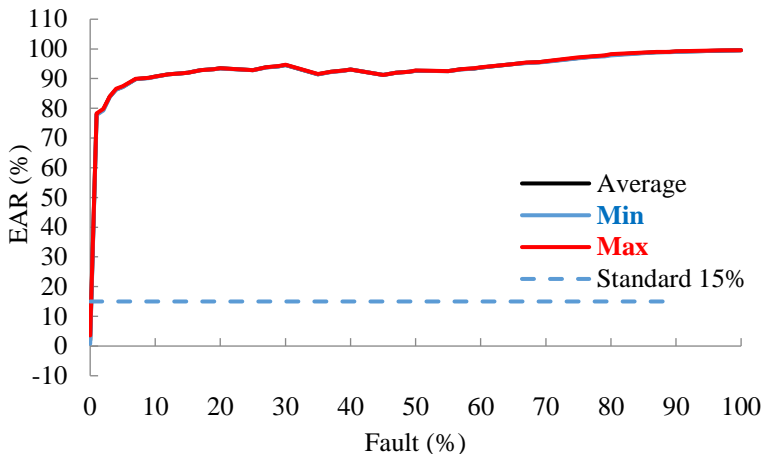
Nilai EAR pada persen fault 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 78.75%, 77.34%, dan 78.07%. Nilai ini terus meningkat hingga pada persentase fault 20% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 91.45%, 91.01%, dan 91.16%. lalu nilai EAR mengalami penurunan hingga pada persen fault 45% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 89.27%, 88.84%, dan 89.06% namun hingga persen fault 99% nilai tersebut terus meningkat dengan nilai EAR maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 99.29%, 98.83%, dan 99%.



**Gambar 4.32** Gelombang Surja Sekunder Fasa a-n, *Inter Turn Fault*

Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi fault dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan sekunder fasa a-n dengan skema memberi *inter turn fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.32. Gelombang surja pada keadaan normal memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang surja tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase fault yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.

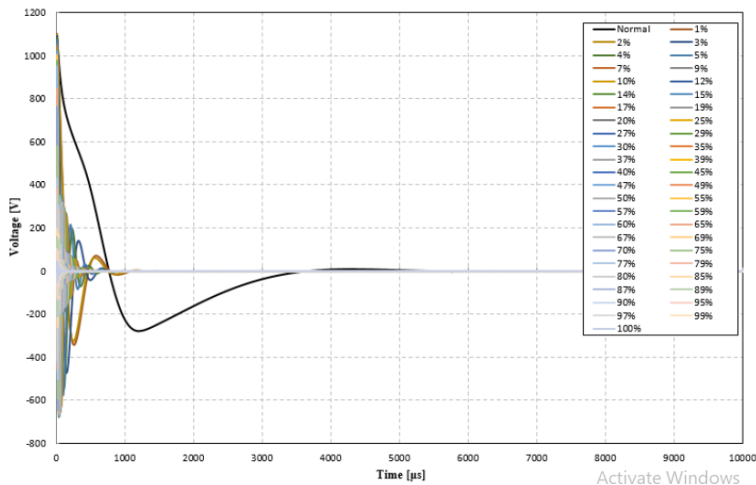




**Gambar 4.33** Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa b-n, *Inter Turn Fault, Test-Ref*

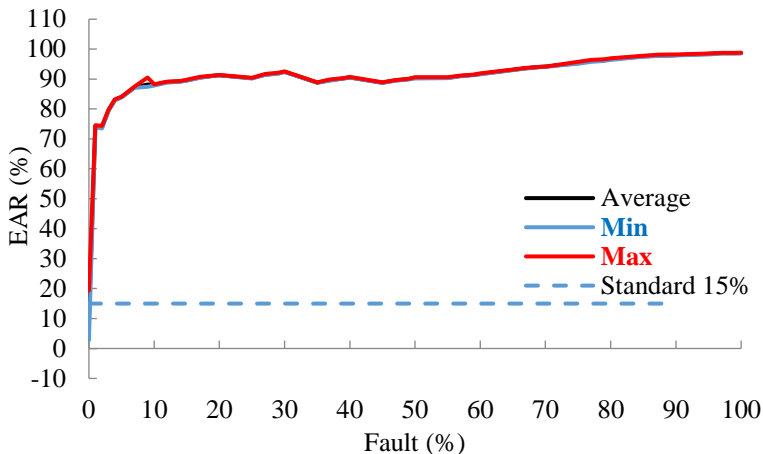
Persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.33 adalah Test-Ref EAR *Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 3.55%, untuk nilai minimum EAR sebesar 0.75%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 1.93%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal.

Nilai EAR pada persen fault 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 78.29, 77.8%, dan 78.01%. Nilai ini terus meningkat hingga pada persentase fault 20% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 93.49%, 93.42%, dan 93.46%. Lalu, nilai EAR terus mengalami kenaikan hingga pada persen fault 30% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 94.69%, 94.56%, dan 94.61% namun nilai tersebut menurun lagi hingga pada persen fault 40% dengan nilai EAR maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 93.11%, 93.05%, dan 93.08%. Selanjutnya, nilai EAR mengalami peningkatan hingga pada persen fault 99% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 99.52%, 99.46%, dan 99.5%.



**Gambar 4.34** Gelombang Surja Sekunder Fasa b-n, *Inter Turn Fault*

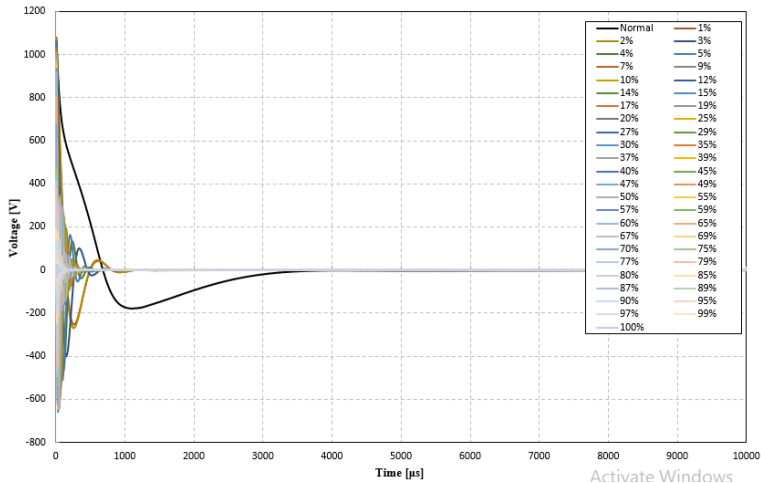
Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi fault dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan sekunder fasa b-n dengan skema memberi *inter turn fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.34. Gelombang surja pada keadaan normal memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase fault yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.



**Gambar 4.35** Nilai EAR Belitan Sekunder Fasa c-n, *Inter Turn Fault*, *Test-Ref*

Selanjutnya, persamaan 2.9 digunakan untuk menentukan nilai EAR pada pengujian ini. Nilai standar EAR yang digunakan pada Gambar 4.35 adalah Test-Ref EAR *Manufacturing* sebesar 15%. Ketika pengujian dilakukan tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo, nilai maksimum EAR yang diperoleh sebesar 19.35%, untuk nilai minimum EAR sebesar 2.76%, sedangkan untuk nilai rata-rata EAR sebesar 10.12%. Berdasarkan perolehan nilai EAR tersebut nilai EAR pada skema pengujian ini tanpa melakukan short circuit secara sengaja kepada belitan trafo atau dengan kata lain dalam keadaan normal, nilai EAR rata-rata yang diperoleh masih dibawah batas standar nilai EAR yang ditentukan

Nilai EAR pada persen fault 1% memiliki nilai maksimum, minimum, dan rata-rata masing-masing sebesar 74.57%, 73.88%, dan 74.22%. Nilai ini terus meningkat hingga pada persentase fault 30% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 92.53%, 92.32%, dan 92.41%. Lalu, nilai EAR mengalami penurunan dari persen fault 45% dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 88.88%, 88.68%, dan 88.78% namun hingga persen fault 90% nilai EAR terus meningkat dengan nilai maksimum, minimum, dan rata-rata sebesar 98.73%, 98.54%, dan 98.66%.



**Gambar 4.36** Gelombang Surja Sekunder Fasa c-n, *Inter Turn Fault*

Bentuk gelombang surja dengan keadaan normal dan variasi fault dari 1% hingga 100% pada pengujian di belitan sekunder fasa C-N dengan skema memberi *inter turn fault* yang disengaja terlihat pada Gambar 4.36. Gelombang surja pada keadaan normal memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari gelombang surja yang lainnya. Selain itu gelombang tersebut memiliki frekuensi yang lebih rendah dari gelombang surja ketika dalam keadaan *short circuit* yang disengaja (*fault*) pada semua persentase fault yang ada. Dari gambar tersebut, frekuensi gelombang surja akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan sedangkan gelombang surja pada keadaan normal akan mengalami penurunan nilai tegangan puncaknya seiring dengan meningkatnya nilai persentase *fault* yang diberikan tetapi tidak linier.

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil dan analisis metode EAR yang telah dilakukan pada pengujian surja terhadap trafo 3 fasa, didapatkan kesimpulan yaitu

1. Hasil pengujian tegangan uji surja terhadap trafo 3 fasa untuk mendeteksi gangguan hubung singkat dapat dianalisis dengan menggunakan metode *error area ratio (EAR)*.
2. Nilai persentase variasi *fault* yang semakin naik menghasilkan nilai EAR yang semakin naik juga namun tidak linier.
3. Gelombang surja yang dihasilkan ketika trafo dalam gangguan hubung singkat memiliki frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan ketika dalam keadaan normal.
4. Pada variabel *inter turn fault*, gelombang surja yang dihasilkan ketika gangguan hubung singkat 1% sangat berbeda dibandingkan gelombang surja ketika keadaan normal sehingga nilai EAR yang dihasilkan sangat berbeda.
5. Berdasarkan standar baker sebesar 15%, ketika trafo dalam keadaan normal nilai EAR yang dihasilkan sudah memenuhi kriteria *pass/fail* pada semua variable pengujian. Namun pada variable *inter turn fault* sisi sekunder konfigurasi *star* fasa c dengan metode Test-Ref EAR, ada beberapa nilai EAR yang dihasilkan belum memenuhi kriteria dengan nilai maksimum 19.35%, minimum 2.76%, dan rata-rata 10.12%.

#### **5.2 Saran**

Penelitian ini masih memiliki banyak kemungkinan kondisi dan standar pengujian yang dapat diuji karena menggunakan trafo 3 fasa sebagai objeknya sehingga dimungkinkan pada penelitian selanjutnya dapat melanjutkan penelitian ini dengan berbagai macam kondisi yang berbeda sehingga didapatkan hasil pengujian yang lebih akurat dan realistis.

Selain itu, untuk mendapatkan nilai tegangan uji yang nilainya sama dengan standar yang ada diharapkan menggunakan IGBT dengan spesifikasi yang lebih tinggi lagi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. Aljohani and A. Abu-Siada, "Minimum Detection of Power Transformer Short Circuit Fault Using Frequency Response Analysis," pp. 1–5.
- [2] V. Behjat and M. Mahvi, "Localising low-level short-circuit faults on the windings of power transformers based on low-frequency response measurement of the transformer windings," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 9, no. 8, pp. 533–539, Sep. 2015.
- [3] P. A. Venikar, M. S. Ballal, B. S. Umre, and H. M. Suryawanshi, "A Novel Offline to Online Approach to Detect Transformer Interturn Fault," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 2, pp. 482–492, Apr. 2016.
- [4] A. A. A. Etumi and F. J. Anayi, "The Application of Correlation Technique in Detecting Internal and External Faults in Three-Phase Transformer and Saturation of Current Transformer," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 5, pp. 2131–2139, Oct. 2016.
- [5] Y. Liu *et al.*, "A study of the sweep frequency impedance method and its application in the detection of internal winding short circuit faults in power transformers," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 4, pp. 2046–2056, Aug. 2015.
- [6] M. I. Dahlan, "Diagnosa Kerusakan Isolasi Trafo Menggunakan Analisa Respon Tegangan Uji Surja," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [7] I. M. Yulistya Negara, *Teknik Tegangan Tinggi: Prinsip dan Aplikasi Praktis*, First. Graha Ilmu, 2013.
- [8] Muhammad Atiqurrohman, "Studi Pemodelan Karakteristik Gelombang Surja Pada Konduktor Pentanahan Horisontal Dengan Diagram Lattice," *Proceeding Semin. Tugas Akhir Jur. Tek. Elektro FTI – ITS*, Feb. 2010.
- [9] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, Fourth. McGraw-Hill Companies.
- [10] J. Wilson, "Current State of Surge Testing Induction Machines," in *Iris Rotating Machine Conference*, 2003, pp. 1–13.
- [11] Plant Services, "Finding Electrical Failure Modes of Rotating Machinery with Electrical Testing Mechanisms."
- [12] Baker Instrum. Co, "Baker Instrument Company AWA Surge Test pass/fail criteria."

- [13] W. J. Nugroho, “Desain Peralatan Penguji Isolasi Belitan Motor Induksi Menggunakan Gelombang Surja Dan Metode Error Area Ratio,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.
- [14] “Concise Technical Guide to Reed Relays.” Pickering Electronics.
- [15] “Specification Sheets for Verivolt Ultra-Compact, High-Bandwidth, Differential Voltage Sensor.” Entube DE-HB-S.



## LAMPIRAN

### 1. Program Arduino

```
int pin_out = 13;
int pin_out2 = 12;
//12 ke relay, 13 ke IGBT
void setup()
{
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pin_out, OUTPUT);
  pinMode(pin_out2, OUTPUT);
  Serial.println("pilih saklar");
  Serial.println("1. saklar 1 ");
  Serial.println("2. saklar 2 ");
}
void lcd()
{
  Serial.println("pilih saklar");
  Serial.println("1. saklar 1 ");
  Serial.println("2. saklar 2 ");
}
void loop()
{
  unsigned int data;
  int coba;
  if (Serial.available() > 0)
  {
    data = Serial.read();
    if (data == 52) //4
    {
      Serial.println("saklar 2 on.....");
      digitalWrite(pin_out2, HIGH);
      delay(5000);
      digitalWrite(pin_out2, LOW);
      delay(1);
      digitalWrite(pin_out, HIGH);
    }
  }
}
```

```

Serial.println("saklar 2 off.....");
delay(3000);
digitalWrite(pin_out, LOW);
Serial.println("saklar 1 off.....");
lcd();
}
}
}

```

## 2. Datasheet Reed Relay

| Contact Specification                          | Unit Condition              | 10kV SPNO                            |                 |          | 10kV SPNC                            |                 |          | 15kV SPNO                            |      |     |
|--|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------|----------|--------------------------------------|-----------------|----------|--------------------------------------|------|-----|
| Contact Material                               |                             | Rhodium                              |                 | Tungsten | Rhodium                              |                 | Tungsten | Tungsten                             |      |     |
| Isolation across contacts                      | kV DC or AC peak            | 10                                   | 10              |          | 10                                   | 10              |          | 15                                   |      |     |
| Switching Power Max.                           | W                           | 50                                   | 50              |          | 50                                   | 50              |          | 50                                   |      |     |
| Switching Voltage Max.                         | V DC or AC peak             | 1000                                 | 7000            |          | 1000                                 | 7000            |          | 10000                                |      |     |
| Switching Current Max.                         | A DC or AC peak             | 3                                    | 2               |          | 3                                    | 2               |          | 2                                    |      |     |
| Carry Current Max                              | A DC or AC peak             | 4                                    | 3               |          | 4                                    | 3               |          | 2                                    |      |     |
| Capacitance across contacts                    | pF coil to screen grounded  | <0.2                                 | <0.2            |          | <0.2                                 | <0.2            |          | <0.2                                 |      |     |
| Lifetime operations                            | dry switching 50W switching | 10 <sup>8</sup>                      | 10 <sup>8</sup> |          | 10 <sup>8</sup>                      | 10 <sup>8</sup> |          | 10 <sup>8</sup>                      |      |     |
| Contact Resistance                             | mΩ max (typical)            | 50 (15)                              | 250(100)        |          | 50 (15)                              | 250(100)        |          | 250 (100)                            |      |     |
| Insulation Resistance                          | Ωmin (typical)              | 10 <sup>10</sup> (10 <sup>13</sup> ) |                 |          | 10 <sup>10</sup> (10 <sup>13</sup> ) |                 |          | 10 <sup>10</sup> (10 <sup>13</sup> ) |      |     |
| Coil Specification                             |                             | 5V                                   | 12V             | 24V      | 5V                                   | 12V             | 24V      | 5V                                   | 12V  | 24V |
| Must Operate Voltage                           | V DC                        | 3.7                                  | 9               | 20       | 3.7                                  | 9               | 20       | 3.7                                  | 9    | 20  |
| Must Release Voltage                           | V DC                        | 0.5                                  | 1.25            | 4        | 0.5                                  | 1.25            | 4        | 0.5                                  | 1.25 | 4   |
| Operate Time                                   | ms diode fitted             | 3.0                                  | 3.0             | 3.0      | 2.0                                  | 2.0             | 2.0      | 3.0                                  | 3.0  | 3.0 |
| Release Time                                   | ms diode fitted             | 2.0                                  | 2.0             | 2.0      | 3.0                                  | 3.0             | 3.0      | 2.0                                  | 2.0  | 2.0 |
| Resistance                                     | Ω                           | 28                                   | 150             | 780      | 38                                   | 240             | 925      | 16                                   | 95   | 350 |
| Relay Specification                            |                             |                                      |                 |          |                                      |                 |          |                                      |      |     |
| Isolation contact/coil                         | kV                          | 17                                   |                 |          | 17                                   |                 |          | 17                                   |      |     |
| Insulation resistance contact to all terminals | Ωmin (typical)              | 10 <sup>10</sup> (10 <sup>13</sup> ) |                 |          | 10 <sup>10</sup> (10 <sup>13</sup> ) |                 |          | 10 <sup>10</sup> (10 <sup>13</sup> ) |      |     |
| Environmental Operating Temp range             | °C                          | -20 to +70                           |                 |          | -20 to +70                           |                 |          | -20 to +70                           |      |     |

3. Datasheet IGBT

International  
**IR** Rectifier

PD- 94239B

**IRGPS60B120KD**

INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR WITH  
ULTRAFAST SOFT RECOVERY DIODE

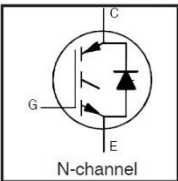
Motor Control Co-Pack IGBT

**Features**

- Low VCE (on) Non Punch Through IGBT Technology.
- Low Diode VF.
- 10µs Short Circuit Capability.
- Square RBSOA.
- Ultrasoft Diode Reverse Recovery Characteristics.
- Positive VCE (on) Temperature Coefficient.
- Super-247 Package.

**Benefits**

- Benchmark Efficiency for Motor Control.
- Rugged Transient Performance.
- Low EMI.
- Significantly Less Snubber Required
- Excellent Current Sharing in Parallel Operation.



$V_{CES} = 1200V$   
 $V_{GE(on)} \text{ typ.} = 2.50V$   
@  $V_{GE} = 15V$ ,  
 $I_{CE} = 60A, T_j = 25^\circ C$



**Absolute Maximum Ratings**

|                           | Parameter  | Max.                              | Units      |
|---------------------------|--|-----------------------------------|------------|
| $V_{CES}$                 | Collector-to-Emitter Voltage                     | 1200                              | V          |
| $I_C @ T_C = 25^\circ C$  | Continuous Collector Current                     | 105@                              | A          |
| $I_C @ T_C = 100^\circ C$ | Continuous Collector Current                     | 60                                |            |
| $I_{CM}$                  | Pulsed Collector Current                         | 240                               |            |
| $I_{LM}$                  | Clamped Inductive Load Current ①                 | 240                               |            |
| $I_F @ T_C = 25^\circ C$  | Diode Continuous Forward Current                 | 120                               |            |
| $I_F @ T_C = 100^\circ C$ | Diode Continuous Forward Current                 | 60                                |            |
| $I_{FM}$                  | Diode Maximum Forward Current                    | 240                               | V          |
| $V_{GE}$                  | Gate-to-Emitter Voltage                          | $\pm 20$                          |            |
| $P_D @ T_C = 25^\circ C$  | Maximum Power Dissipation                        | 595                               | W          |
| $P_D @ T_C = 100^\circ C$ | Maximum Power Dissipation                        | 238                               |            |
| $T_J$                     | Operating Junction and Storage Temperature Range | -55 to +150                       | $^\circ C$ |
| $T_{STG}$                 | Soldering Temperature, for 10 sec.               | 300 (0.063 in. (1.6mm) from case) |            |

**Thermal Resistance**

|                 | Parameter                                      | Min.   | Typ.       | Max. | Units        |
|-----------------|--|--------|------------|------|--------------|
| $R_{\theta JC}$ | Junction-to-Case - IGBT                        | —      | —          | 0.20 | $^\circ C/W$ |
| $R_{\theta JC}$ | Junction-to-Case - Diode                       | —      | —          | 0.41 |              |
| $R_{\theta CS}$ | Case-to-Sink, flat, greased surface            | —      | 0.24       | —    |              |
| $R_{\theta JA}$ | Junction-to-Ambient, typical socket mount      | —      | —          | 40   |              |
|                 | Recommended Clip Force                         | 20 (2) | —          | —    | N(kgf)       |
| Wt              | Weight   | —      | 6.0 (0.21) | —    | g (oz)       |
| Le              | Internal Emitter Inductance (5mm from package) | —      | 13         | —    | nH           |

www.irf.com

# IRGPS60B120KD

International  
IR Rectifier

## Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

|                                 | Parameter                               | Min. | Typ. | Max.      | Units               | Conditions   | Ref.Fig. |
|---------------------------------|---|------|------|-----------|---------------------|--|----------|
| $V_{BR(CES)}$                   | Collector-to-Emitter Breakdown Voltage  | 1200 | —    | —         | V                   | $V_{GE} = 0V, I_C = 500\mu A$  |          |
| $\Delta V_{BR(CES)}/\Delta T_J$ | Temperature Coeff. of Breakdown Voltage | —    | 0.40 | —         | $V/^\circ\text{C}$  | $V_{GE} = 0V, I_C = 1.0mA, (25^\circ\text{C}-125^\circ\text{C})$     |          |
| $V_{CE(sat)}$                   | Collector-to-Emitter Saturation Voltage | —    | 2.33 | 2.50      | V                   | $I_C = 50A, V_{GE} = 15V$  | 5, 6     |
|                                 |   | —    | 2.50 | 2.75      |                     | $I_C = 60A$  | 7, 9     |
|                                 |   | —    | 2.79 | 3.1       |                     | $I_C = 50A, T_J = 125^\circ\text{C}$                                 | 10       |
|                                 |   | —    | 3.04 | 3.5       |                     | $I_C = 60A, T_J = 125^\circ\text{C}$                                 | 11       |
| $V_{GE(th)}$                    | Gate Threshold Voltage                  | 4.0  | 5.0  | 6.0       |                     | $V_{GE} = V_{GE}, I_C = 250\mu A$                                    | 9, 10    |
| $\Delta V_{GE(th)}/\Delta T_J$  | Temperature Coeff. of Threshold Voltage | —    | -12  | —         | $mV/^\circ\text{C}$ | $V_{GE} = V_{GE}, I_C = 1.0mA, (25^\circ\text{C}-125^\circ\text{C})$ | 11, 12   |
| $g_{fs}$                        | Forward Transconductance                | —    | 34.4 | —         | S                   | $V_{GE} = 50V, I_C = 60A, PW=80\mu s$                                |          |
| $I_{CES}$                       | Zero Gate Voltage Collector Current     | —    | —    | 500       | $\mu A$             | $V_{GE} = 0V, V_{CE} = 1200V$  |          |
|                                 |   | —    | 650  | 1350      |                     | $V_{GE} = 0V, V_{CE} = 1200V, T_J = 125^\circ\text{C}$               |          |
| $V_{FM}$                        | Diode Forward Voltage Drop              | —    | 1.82 | 2.10      | V                   | $I_C = 50A$  | 8        |
|                                 |   | —    | 1.93 | 2.20      |                     | $I_C = 60A$  |          |
|                                 |   | —    | 1.96 | 2.20      |                     | $I_C = 50A, T_J = 125^\circ\text{C}$                                 |          |
|                                 |   | —    | 2.13 | 2.40      |                     | $I_C = 60A, T_J = 125^\circ\text{C}$                                 |          |
| $I_{LES}$                       | Gate-to-Emitter Leakage Current         | —    | —    | $\pm 100$ | nA                  | $V_{GE} = \pm 20V$   |          |

## Switching Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

|              | Parameter                            | Min.        | Typ.  | Max.  | Units   | Conditions   | Ref.Fig.   |
|--------------|--------------------------------------|-------------|-------|-------|---------|--|------------|
| $Q_g$        | Total Gate Charge (turn-on)          | —           | 340   | 510   |         | $I_C = 60A$  | 23         |
| $Q_{ge}$     | Gate - Emitter Charge (turn-on)      | —           | 40    | 60    | nC      | $V_{CC} = 600V$  | CT1        |
| $Q_{gc}$     | Gate - Collector Charge (turn-on)    | —           | 165   | 248   |         | $V_{GE} = 15V$   |            |
| $E_{on}$     | Turn-On Switching Loss               | —           | 3214  | 4870  | $\mu J$ | $I_C = 60A, V_{CC} = 600V$   | CT4        |
| $E_{off}$    | Turn-Off Switching Loss              | —           | 4783  | 5450  |         | $V_{GE} = 15V, R_G = 4.7\Omega, L = 200\mu H$  | WF1        |
| $E_{tot}$    | Total Switching Loss                 | —           | 8000  | 10320 |         | $L_s = 150nH, T_J = 25^\circ\text{C}$  | WF2        |
| $E_{on}$     | Turn-On Switching Loss               | —           | 5032  | 6890  |         | $T_J = 125^\circ\text{C}$  | 13, 15     |
| $E_{off}$    | Turn-Off Switching Loss              | —           | 7457  | 8385  | $\mu J$ | Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.   |            |
| $E_{tot}$    | Total Switching Loss                 | —           | 12500 | 15275 |         |  |            |
| $t_{d(on)}$  | Turn-On Delay Time                   | —           | 72    | 94    |         | $I_C = 15A, V_{CC} = 600V$   | 14, 16     |
| $t_r$        | Rise Time                            | —           | 32    | 45    |         | $V_{GE} = 15V, R_G = 4.7\Omega, L = 200\mu H$  | CT4        |
| $t_{d(off)}$ | Turn-Off Delay Time                  | —           | 366   | 400   | ns      | $L_s = 150nH, T_J = 125^\circ\text{C}$   | WF1        |
| $t_f$        | Fall Time                            | —           | 45    | 58    |         |  | WF2        |
| $C_{iss}$    | Input Capacitance                    | —           | 4300  | —     |         | $V_{GE} = 0V$  |            |
| $C_{oes}$    | Output Capacitance                   | —           | 395   | —     | pF      | $V_{CC} = 30V$   | 22         |
| $C_{res}$    | Reverse Transfer Capacitance         | —           | 160   | —     |         | $f = 1.0MHz$   |            |
| RBSOA        | Reverse Bias Safe Operating Area     | FULL SQUARE |       |       |         | $T_J = 150^\circ\text{C}, I_C = 240A, V_p = 1200V$<br>$V_{clamp} = 1000V, V_{GE} = +15V \text{ to } 0V$<br>$R_G = 4.7\Omega$ | 4<br>CT2   |
| SCSOA        | Short Circuit Safe Operating Area    | 10          | —     | —     | $\mu s$ | $T_J = 150^\circ\text{C}, V_p = 1200V$<br>$V_{CC} = 900V, V_{GE} = +15V \text{ to } 0V,$<br>$R_G = 4.7\Omega$                | CT3<br>WF4 |
| $E_{rec}$    | Reverse Recovery energy of the diode | —           | 3346  | —     | $\mu J$ | $T_J = 125^\circ\text{C}$  | 17, 18, 19 |
| $t_{rr}$     | Diode Reverse Recovery time          | —           | 180   | —     | ns      | $V_{CC} = 600V, I_F = 60A, L = 200\mu H$   | 20, 21     |
| $I_{rr}$     | Diode Peak Reverse Recovery Current  | —           | 50    | —     | A       | $V_{GE} = 15V, R_G = 4.7\Omega, L_s = 150nH$   | CT4, WF3   |



Halaman ini sengaja dikosongkan

## RIWAYAT HIDUP



**Prasetyo Tri Anggoro** dilahirkan di Tangerang, 24 September 1996. Penulis memulai jenjang pendidikan Taman Kanak-Kanak di Islamic Village Tangerang, Sekolah Dasar di Islamic Village dari tahun 2002-2007, lalu di SDN Karawaci 6 Tangerang dari tahun 2007-2008. Setelah itu penulis melanjutkan studinya di SMP Negeri 9 Tangerang dan lulus pada tahun 2011. Selanjutnya penulis melanjutkan sebagai murid SMA Negeri 1 Tangerang dari tahun 2011-2014. Pada tahun 2014, penulis melanjutkan jenjang pendidikan di Perguruan Tinggi di Jurusan S1 Teknik

Elektro Program Studi Teknik Sistem Tenaga di ITS Surabaya hingga lulus pada tahun 2018.